山岳域の電力ダムを対象としたダム流入量予測技術の実用化に関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

橋本, 徳昭

山岳域の電力ダムを対象とした
ダム流入量予測技術の実用化に関する研究

橋本　徳昭

山岳域の電力ダムを対象としたダム流入量予測技術の実用化に関する研究

目次

第2章　急峻な山岳域における気象・降雨特性の解明に関する研究

第３章　急峻な山岳域における降雨量の予測技術に関する研究

第４章　ダム流域からの降雨流出量の予測技術に関する研究

第５章　降雨～流出予測手法の統合・実運用に関する研究

緒　論

電力ダムのような利水ダムの場合、治水上の積極的な役割は義務付けられていないものの、ダムの設置、操作に起因するいわゆる「ダム災害」の発生を防止するための措置をダム設置者は取らねばならず、具体的には河川法第 44 条から 51 条において「ダムに関する特則」が定められている。これらの措置の中には、水位、流量といった「ダム諸量」の計測や記録の作成といった設備対応を要するものの他に、ダム設置、操作に伴う危害防止のための措置のように、出水状況などその時々の自然条件に応じて、操作規程に基づいて、臨機応変に的確な対応が求められるものもある。

ダム管理を行うにあたって最も難しい課題の一つが臨機応変に的確なダム操作を行うことであると考える。

個々のダムには、予め河川管理者の承認を得ている操作規程があり、これを遵守することがダム管理者にとっては絶対的な要件である。しかし、これはあくまでもダム管理をしていく上でのいわば「根本ルール」を定めたものであり、千変万化するダムへの流入に的確に対応する現場における「直接的な解」を与えているものではない。

従来から、洪水吐ゲートの操作を必要とするダムには、ダム勤務員が常駐し、天気予報や雨量データ、上流の流量データの変化などを見ながら、ダム勤務員の個人的な経験に基づいて、操作規程に違反しないようにゲート操作を行ってきた。しかしながら、利水ダムには貯留している水資源の有効利用という本質的なニーズがある。利水ダムのうち上水道、灌漑用のダムの場合には年間を通じての水需要が基本となるため比較的長期の出水予測が必要となると思われる。

一方、電力ダムの場合には、当日の電力需要に応じて、水力・火力・原子力のベストミックスとなるように水力発電所の運用が決められる。そのため、貯水池式水力発電所のように年間運用をしている場合には上水道や灌漑同様に長期の出水予測が必要となるが、数の点ではるかに多い日運用を行う調整池式水力発電所の場合には当日の出水状況が重要であり、精度のよい短期出水予測が必要である。発電力 $P=\eta \cdot g \cdot Q \cdot H$（$\eta$：効率、g：重力加速度、Q：使用水量、H：落差）であることから、落差を得るためのダム水位が高ければ高いほど、ダムから溢水させない限り、発電にとって有効になる。そのため、水力発電所をはじめとする全電源の運転を統括する給電指令は出水時には極力水力をフル活用しようという判断となり、それに伴いダム勤務員もその要請に極力応えようというある種の「使命感」を持つ傾向がある。そのため、出水を控え、操作規程に基づくダム水位の予備低下

のタイミングを遅らせてしまうミスを犯す可能性が常に付きまとっているといえよう。

出水時のダム流入量が事前に完全に予測できれば、ダム水位を出水時にも満水位近くに維持したまま、流入量が発電最大使用水量以下である限り、ダムから溢水させることなく、100％発電に利用できることとなる。

こうした理想状態はいわば「神様運用」であり非現実的であるとしても、経験と勘に頼った洪水吐ゲート操作は、ダム勤務員に大きな負担となっているが、なかなか改善できないのが現状である。電力ダムではないが、本研究の準備を始めた今から約10年前に国土交通省関連と農林水産省関連のダムを対象に行われた「ダム貯水池の流水管理に関するアンケート調査」[1)]では、必要とする洪水予測のリードタイムが 1～3 時間先であると回答したダムが90％以上を占めており、予備放流方式を採用している8ダムでは6時間以上が必要と回答されている。さらに、洪水予測方法は流出モデルを利用されている傾向はあるものの、全体の70％は経験的予測や上流水位の利用といった段階に留まっていることがわかる。さらに流出予測に実流量を用いたフィルタリングを採用している例はほとんどないといった状況であった。

電力ダムにおいては、上記のアンケートにある予備放流方式のダムが多いため、ダム勤務員が予備放流のタイミングを的確に計ることができるようにするために、洪水予測のリードタイムを3～4時間程度は確保したいというニーズがあり、かねてからダム流入量予測システムの開発が行われてきた。

ダム流入量の予測システムは大きく 2 つのサブシステム、すなわち降雨予測システムと流出予測システムから構成される。さらに現場で実運用に供しうるためには、リアルタイムでの予測を可能とするシステムである必要がある。これらの要件を満たそうとした電力ダム管理者による研究としては、降雨予測に関して垣見ら[2)]、ダム流入量予測に関して本田ら[3)]などがある。しかしながら、前者は阿賀野川水系 11 のダム群の管理のために気象レーダーからのデータを活用したシステムであり、全体として予測精度は良好であるが、大気不安定時の降雨予測について改良が必要と結論づけ、ダムが位置する山岳域の特徴である局所的な豪雨の予測に課題を残している。後者は小流域に分布型タンクモデルを用いて 3 時間先までの予測システムを開発したが、洪水のピーク発生時刻の予測精度は高いものの、ピーク流量の予測精度に改善の余地を残している。

著者の所属する関西電力においても、1980 年代からダム勤務員の行う洪水吐ゲート操作支援システムの開発に取り組み、1988 年以降、出水予測機能やダム諸量の自動記録といった機能を有する「高機能卓」と称する洪水吐ゲート操作卓を開発し、現場に配備するよう

になった[4]。出水予測機能としては、降雨予測は行わず流域内雨量計の実測値を入力値とし、貯留関数法に基づき流出予測を行うものであり、予測リードタイムおよび精度の面で一定のレヴェルに留まるものであった。

このような状況下、1990年9月に紀南地方を襲った台風19号により日置川で洪水に伴う浸水被害が発生し、関西電力の電力専用ダムである殿山ダムの操作ミスが原因ではないかとの訴訟が生じることとなった。結果的には、最高裁で関西電力は無罪を勝ち取ったが、台風の常襲地帯である紀南地方における、より精度の高い出水予測の必要性を認識し、その開発に取り組んだ[5]。台風情報は襲来前から相当量の情報が気象官署から得られるほか、事前にダム管理側もそれなりの準備態勢が整えられるため、予測システムの開発には相当の苦心を要したものの、ダム操作の観点からは比較的取り扱いやすい対象であったといえる。

しかしながら、同じような山岳域にあるダムであっても、北陸地方のように台風の襲来に伴う出水の可能性は低いものの、低気圧や前線による大気不安定に伴う降雨出水の予測、とりわけ黒部川水系のように急峻で3,000m級の山岳に囲まれた流域の場合には、鉛直方向の大気擾乱による局所的な豪雨の可能性が高いため、リアルタイムのダム流入量予測になかなか踏み出せない状況にあった。ところが黒部川水系におけるダム排砂の実施や大出水災害対応上、この流域での高精度のダム流入量予測の必要性が非常に高まってきたことが本研究のきっかけとなっている。

降雨予測については、気象観測技術、計算機処理能力の向上などを背景として、近年大きな発展を見せており、気象庁から配信される気象データが内容、頻度ともに年々充実し、またそれらを利用して独自に降雨予測を行う手法[6]の開発も進んでいる。

一方、流出予測にあたっては、電力ダムを対象にした場合、数百平方km程度の山岳域の流域を対象としてリアルタイムに予測できる必要があり、これまで多く用いられてきたタンクモデルや貯留関数法などの集中型モデルに留まらず、山岳域における降雨の局所性や移動性を的確に反映し、かつ山腹斜面および河道における流出過程を物理的にモデル化した分布型モデルの開発[7]や、分布型モデルに観測流量データを用いたフィルタリングを行う手法[8]なども研究されている。

本研究では黒部川水系を対象フィールドとして、上記に述べたような最新の水文解析の研究成果と気象庁の発表する天気・大気データシステムおよびダム管理者が独自に観測する気象・水文データを組み合わせて、「黒部川水系のダム群のゲート操作を良い精度で支援

しうる降雨～流出予測システム」の開発をおこない、電力ダム管理の実運用に供した。

本論文はこれまでの研究成果を取りまとめたものであり、その内容、構成は次のとおりである。

第１章では、治水容量を持たない電力ダムの運用の現状と課題を整理し、高精度のダム流入量予測の必要性をまとめる。つぎに、これまでの降雨 - 流出予測の開発状況について概観し、それらの実運用上の課題を整理する。また、研究対象とした黒部川水系のダム群への既存流入量予測手法の適用の限界を示し、本研究の必要性を明確にする。

第２章では、黒部川水系の流域全体を対象に、ダム管理者および気象官署の気象・降雨データに基づいて、黒部峡谷一帯の降雨特性を分析する。さらに、黒部峡谷一帯の降雨メカニズムの一端を解明することを目標にして、X－band ミニレーダー、GPS ゾンデ、ドップラーレーダー観測を実施し、それらのデータから降雨特性の解析を行った結果をまとめる。

第３章では、急峻な山岳地帯に位置する黒部峡谷において 4～5 時間先の降雨予測を的確に行ううえで必要な降雨予測モデルとして、運動学的手法と物理的手法を線形的に接続した「ハイブリッド降雨予測手法」を開発した結果を示す。さらに可降水量および気象庁の最新プロダクトを利用して予測精度の向上を実現した結果について述べる。

第４章では、複雑で急峻な地形を持つ黒部峡谷に相応しい流出解析手法として分布型流出モデルを採用し、斜面の流出計算には市川ら [7]の「集中化された表面流・中間流統合型 kinematic wave モデル」を、河道の流出計算には藤田ら [8]の「河道網集中型 kinematic wave モデル」にカルマンフィルタを適用しリアルタイムで予測計算を可能とする手法を提示する。さらに精度向上を図るために、有効降雨モデルおよび、黒部川特有の現象である融雪に伴う基底流量の概念を取り込んだダム流域からの降雨流出量予測手法の構築について述べる。

第５章では、第３章、第４章で開発した黒部峡谷における降雨予測、流出予測手法を統合し、黒部川水系のダム群に実際に配備したシステムを示すとともに、本システムの運用成果を示し、開発したシステムの有効性を明らかにする。

緒論　参考文献

1) 角屋　睦，永井明博：ダム貯水池の流水管理に関するアンケート調査の概要，ダム工学，No.22，pp.50-56，1996.

2) 垣見健三，柏倉勇，笠原克浩：GPV データを活用した降雨予測，電力土木，No.269，pp.40-46，1997.

3) 本田章人，三浦雅彦，村上晃生：10 分間更新短時間降雨予測手法を用いた河川流出予測の現地適用性，電力土木，No.313，pp.82-86，2004.

4) 中塚龍一，平　耕二：ダム操作シミュレータ装置の概要と導入教育，電力土木，No.248，pp.25-32，1993.

5) 森本　浩，小久保鉄也，前山昌三，角田　恵：ダム流域を対象とした降雨予測手法の開発研究，電力土木，No.268，pp.83-90，1997.

6) Takada, N., A. Masuda, H. Tsujimoto, M. Okuda, Y. Takeuchi : Short-term Rainfall Forecast using a Numerical Model Assimilated by the Radar Data, Proc. of Fifth International symposium on Hydrological Applications of Weather Radar , pp.359-364, 2001.

7) 市川　温，小椋俊博，立川康人，椎葉充晴，宝　馨：山腹斜面流出系における一般的な流量流積関係式の集中化，水工学論文集，第 44 巻，pp.145-150，2000.

8) 藤田　暁，大東秀光，上坂　薫，椎葉充晴，立川康人，市川　温：分布型流出モデルに基づくダム流入量実時間予測モデルについて，水工学論文集，第 45 巻，pp.115-120，2001.

第１章　電力ダム運用の実態とダム流入量予測に対する要請

１．１　概説

本章では、電力ダムに焦点をあて、その運用の実態を整理した後、ダムを適切に運用、管理していくためには、精度の高いダム流入量予測が必要であることを論じる。本章の構成は、次のとおりである。

第２節においては、本研究に関連する導入として、電力ダムの運用の実態と課題について説明する。まず、電力ダムの役割や歴史を述べた後に、河川にダムを設置することによって生じる影響とダム管理者に課せられた責務、さらにこの責務を満足するための具体的なダム操作方法を解説する。また、これまでに生じたダムに係わる事故や災害事例についても紹介する。これらを踏まえ、電力ダムの管理者に課せられた運用上の課題について述べる。

第３節においては、まず、本研究の主目的である降雨予測と流出予測の現状とこれまでのリアルタイムダム流入量予測システムの事例について整理し、第２節でまとめた電力ダムの管理者に課せられた運用上の課題に基づき、精度の高いダム流入量予測の必要性を論じる。最後に、本研究を進めるにあたり、具体的な研究フィールドとして、黒部川を選定し、黒部川で特に求められるダム流入量予測のニーズについてとりまとめ、次章以降で説明するダム流入量予測システムの必要事項を明らかにする。

１．２　電力ダムにおける運用の実態と課題

１．２．１　電力ダムの役割と歴史

（１）水力発電とダム

わが国における水力発電は、1892 年に電気事業用として蹴上発電所が運転を開始して以来、近代化、工業化に伴う電灯・電力需要の伸びに対応しつつ発展を続け、1950 年代までは水主火従といわれるように電力供給の中心を担ってきた。それ以降、新鋭大型火力、原子力の割合が増加する中にあっても着実に電力供給の一翼を担い、2004 年度末現在では、全電力供給に対する割合は発電電力量の 10%、設備容量の 19%を占めている [1)]。

昨今のエネルギーセキュリティや地球環境問題への対応が求められる情勢下において、純国産かつクリーンな循環エネルギーとしての重要な役割は、その重みを増しこそすれ減じることはない。

このような水力発電の発展に対して、ダムは、当初の流れ込み式発電所における取水の安定確保という役割に留まらず、落差の確保、電力需要の日間変動、河川流況の季節変動への対応など、河川水の保有するエネルギーを最大限に活用するために重要な役割を果たし、ダム施工技術の向上とあいまって、その建設と大規模化が進むこととなった。

（２）河川法の制定と改正の経緯 [2),3),4)]

大規模な河川構造物である利水ダムは河川法に則って管理を行う必要がある。

この河川法は 1896 年に旧河川法が制定されて以来、何度かの改正を経て現在に至っている。

旧河川法の内容は、治水に重点がおかれ利水の面には十分の配慮が払われていなかった。近代産業の発展にともない河川の流水の利用が増加し、利水関係諸規定の整備が試みられたが、関係省庁等との調整等がつかず、戦後しばらくまで改正が進まなかった。

一方、戦後になって、復興、エネルギー不足、治水対策の要請等から、多目的ダムの建設が盛んとなった背景により、1957 年に特定多目的ダム法が制定された。これにより、当時の多目的ダムは河川管理者、電気事業者、水道および工業用水事業者の共同施設として建設され、完成後の管理については一元的に実施されていなかったものが、国直轄の多目的ダムについては、一元的に建設大臣自らが施工し、完成後も自ら維持管理することとなった。

1964 年になって、約 70 年前の時代背景のもと制定された旧河川法が廃止され、新たな河川法が制定された、その制定の主な理由として以下のものが挙げられた。

①新憲法の制定に伴う河川管理方式の近代化の必要性

②戦後の社会経済の進展に応ずるための、従来の区間主義ではなく、水系を一貫した河川の管理体系確立の必要性

③農工業用水、上水道、発電等、種々の河川の流水利用の拡大に伴い、利水関係規定の整備を図ることの必要性

④ダムの設置又は操作に起因する災害の発生防止いわゆるダム防災に関する規定整備の必要性

その後、さらなる社会情勢の変化により、河川は治水、利水の役割を担うだけでなく、潤いのある水辺空間や多様な生物の生息・生育環境として、また、地域の風土と文化を形成する重要な要素として、その個性を生かした川づくりが求められることとなった。このため、1997 年に河川法の一部改正が行われ、現在に至っているが、利水ダム管理者にとっては、1964 年の制定条項が依然として主要な関係部分となっている。

１．２．２　出水時における利水ダム管理者の責務 [5),6),7)]

ダムの建設により流水をせき止め、河川の一部をダム湖とする場合、河川の持つ多様な機能は変化を余儀なくされる。電力ダムのような利水ダムにおいては治水上の積極的な役割は義務づけられていないが、流域の状況や河川の特性、貯水池や洪水吐の条件によっては、ダムの設置により治水上の悪影響を生じる恐れがある。

このため、河川法第 44 条から第 51 条において「ダムに関する特則」が定められ、ダムの設置、操作に起因するいわゆる「ダム災害」の発生を防止するための措置、ダムの設置者がとらなければならない措置が定められている。列挙すれば、

第 44 条　河川の従前の機能の維持

第 45 条　水位、流量等の観測

第 46 条　ダムの操作状況の通報等

第 47 条　ダムの操作規程

第 48 条　危害防止のための措置

第 49 条　記録の作成等

第 50 条　管理主任技術者の設置

第 51 条　兼用工作物であるダムについての特則

である。以下に主要な項目として、第 44 条「河川の従前の機能の維持」、第 48 条「危害防止のための措置」、第 47 条「ダムの操作規程」について順に説明する。なお、電力ダムにおいては、一般的に「ダム設置者」すなわち「ダム管理者」であることから、以降においては法令の記述にかかわらず、「ダム管理者」の用語を用いることとする。

（１）河川の従前の機能の維持

ダムを設置することによる河川の機能の変化のうち、特に洪水による災害の発生の危険性を増大させる恐れのあるマイナス面の変化を対象として、河川法第 44 条には「河川の従前の機能の維持」に関して規定がなされている。

具体的に、河川の従前の機能が減殺される現象は、以下の 3 つとされている。

①河道の貯留機能の減少

ダムが設置される以前の河道は、常時に流水を疎通させているため、洪水発生の際、水位が上昇する間、流水を河道に貯留する機能を有している。ところがそこに利水ダムが築造されると、その設置目的の性質上、豊水時にできる限り水を貯え渇水に備えるように貯水池運用が図られるため、一般に洪水時に貯水池が満水に近い状態で洪水のピークを迎えることが想定される。このようなダムでは、貯水池となった河道区間において流水を貯留する機能を減じていると考えられ、これを「河道の貯留機能の減少」と呼んでいる。

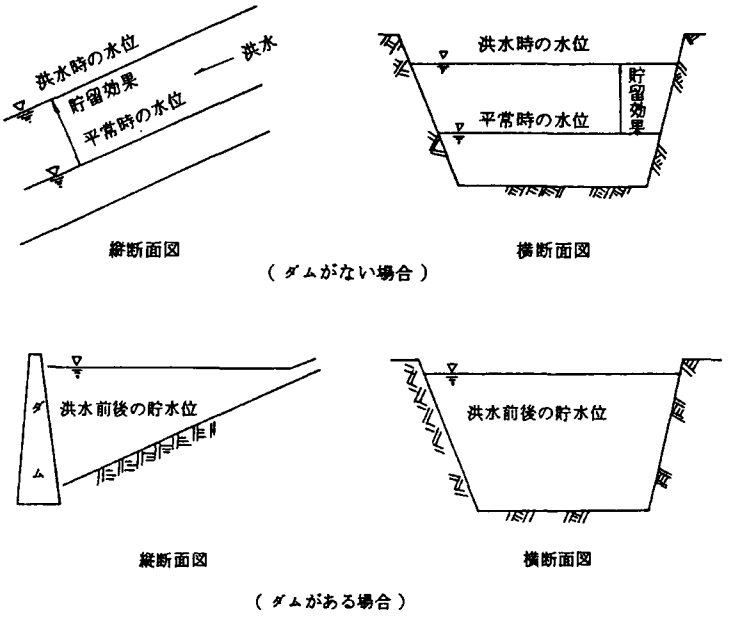


図-1.2.1　河道の貯留機能の減少（概念図）[7)]

②洪水伝播速度の増大

ダムが設置される以前においては、河道を洪水が流下する速度は、河川の勾配、河川の横断形状および河床の状況等により定まり、ダムが築造されるような山間部の河道では、毎時 10～20km 程度である。これに対して、ダムが設置されると、貯水池上流端に流入した洪水がダム地点にまで到達する速度は、ダム設置前の河道を流下する速度よりも数倍も速くなる。これを、ダムによる「洪水伝播速度の増大」と呼ぶ。

③貯水池における背水・背砂の影響

上流の河道を流下した洪水が貯水池上流端の水面に流入するとき、貯水池水位に影響され、ダムがない場合と比べて、部分的に水位の上昇が見られる。これをダムの背水という。また、背水の生ずる付近では流水によって上流から運ばれてきた土砂が掃流力の低減した水域に入って沈降、堆積する。これを背砂と呼び、この背砂によって上昇した河床の上に背水が重なると、さらに水位が上昇することとなり、上流域で洪水時に浸水被害等を発生させる恐れが大きくなる。これを「貯水池における背水・背砂の影響」と呼ぶ。

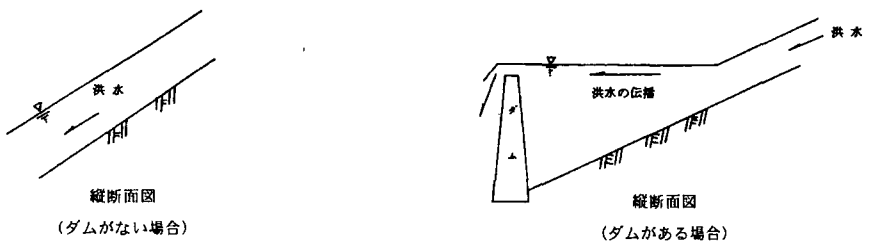


図-1.2.2　洪水伝播速度の増大（概念図）[7)]

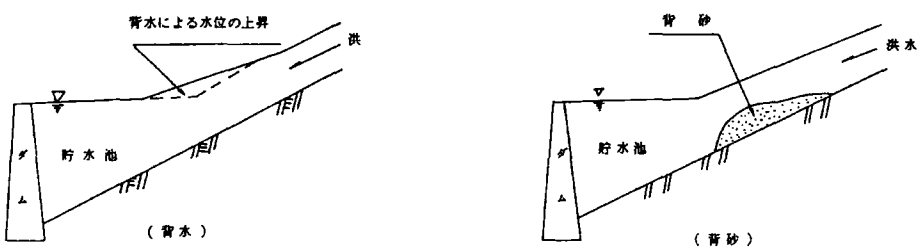


図-1.2.3　貯水池における背水・背砂の影響（概念図）[7)]

（２）危害防止のための措置

河川法に定められる危害の防止のための措置として、具体的には、ダム操作によって下流の流水の状況に著しい変化を生じる場合、流域の関係都道府県知事、関係市町村長および関係警察署長に対して、通知することが求められている。さらに、水泳、魚釣り、キャンプ、砂利の採取などを行っている一般の入川者に対しては、立札による掲示を行うほか、サイレンや警報車等によって周知することが求められている。これら、関係機関への通知ならびに一般へ周知するための措置は、放流の一定時間前までに実施しなければならない。

（３）ダムの操作規程

（１）で述べた河川の従前の機能を維持しつつ、（２）で述べた危害防止の措置、その他諸規定を遵守するために、ダム管理者が、各ダムの特性に応じて個別に操作規程を定め、河川管理者の承認を得なければならず、ダムの操作はこの承認を受けた操作規程に従って行わなければならない。

この操作規程の内容およびこれに従ったダム操作については、１．２．３において詳述する。

１．２．３　利水ダムの種別と操作方法

既に述べたように、河川法には、ダムの設置によって河川の従前の機能が減殺されることがないようにするために「ダムに関する特則」の諸規定を設けることで、ダムの適正な運営確保が図られているが、多数のダムを個々に見れば、規模、構造、立地条件等の相違により、河川の従前の機能に対する影響の程度は一様でない。そこで、河川に設置されているダムについて阻害要因別分類が行なわれており、昭和 41 年（1966 年）5 月 17 日付河川局長通達「河川法第 2 章第 3 節第 3 款（ダムに関する特則）等の規定の運用について」では、法第 26 条の許可を受けて設置するダムで、基礎地盤から堤頂までの高さが 15m 以上のものを次のように 4 分類している [6)]。また、これらのダムがそれぞれ出水時にとるべき操作を表-1.2.1 に示す。

①第 1 類ダム

「その設置に伴い下流の洪水流量が著しく増加するダムで、これによって生ずる災害を防止するため当該増加流量を調節することができると認められる容量を確保して洪水に対処する必要があるもの」

②第２類ダム

「堆砂によりその上流の河床が上昇したダム又はその設置者が貯水池の敷地として権原を取得した土地の広さが十分でないダムで、洪水特にその上流の水位上昇することによって生ずる災害を防止するため、貯水池の水位を予備放流水位として洪水に対処する必要があるもの」

③第３類ダム

「貯水池の容量に比して洪水吐の放流能力が大きいダム又は洪水吐ゲートの操作の方法が複雑であるダムで貯水池の水位を予備放流水位として洪水に対処することが、災害発生の防止上適切と認められるもの」

この第３類のダムは、貯水池の容量が流入量に比して小さく、貯水池水位が急激に上昇する恐れがあり、ダムを越流させないため急激なゲート放流となる恐れがあるダム、ゲートの門扉の多いダム等のゲート操作が難しいダムで、事前に貯水位を下げて洪水に対処するのが望ましいダムである。実際の運用にあたっては、洪水吐ゲートを有するダムで

①水系最下流のダム

②下流に住家、耕地等が開けているダム

③洪水吐ゲートの門数が３門以上あるダム

④計画洪水流量が 1,000m^3/sec 以上であるダム

のどれか一つ以上に該当するものが第３類ダムとされている。

④第４類ダム

「貯水池の水位を常時満水位として洪水に対処しても災害の発生の防止上支障のないダム」

表-1.2.1　利水ダムの分類

分類	内容	想定される問題	主な対処方法	関西電力㈱の管理するダム数
第１類	・洪水吐ゲートあり ・下流の洪水流量を著しく増加するおそれ	・ピーク流量の増大 ・着水時間の短縮	予備放流 遅らせ放流	5
第２類	・洪水吐きゲートあり ・堆砂により湛水地末端河床が上昇するおそれ	・背水による民有地の浸水、冠水	予備放流	7
第３類	・洪水吐ゲートあり ・貯水池の容量に比べ洪水吐ゲートの放流能力が大 ・ゲート操作が複雑	・急激な流入量の増大によりダム水位が常時満水位を超過	予備放流	17
第４類	・常時満水位で洪水を迎えても災害のおそれなし	－	（自流放流）	21

（2006 年 3 月 31 日現在）

さらに同通達では、ダムの操作規程を定める場合、「標準操作規程」の例によることとしている。この標準操作規程の条文の一部を図-1.2.4 に示し、この操作規程に従ったダム操作として、第１類ダムの操作方法の一例を図-1.2.5 に示して以下にその手順を述べる。

電力ダムにおいては、通常、発電効率を考慮して常時満水位に近い状態で、運転（発電放流＋維持放流）を行っている。この状態で出水を迎える場合、既に述べた「河川の従前の機能の維持」を目的として、第１類ダムの場合、具体的には、河道の貯留機能の減少および洪水伝播速度の増大に対処するために、ダム流入量が洪水量に達する前に予備低下水位までダム水位を低下し、洪水量に達した以降は、ダム流入量と同量の放流を一定時間遅らせる操作（遅らせ操作）を行うことが必要である。

まず、増加傾向にあるダム流入量に対応するために、一定範囲までは利水放流量（＝発電取水量）を増加させることでダム水位の上昇を抑えることができるが、あるタイミングで維持放流量以上の流量を洪水吐ゲートから放流する必要がある。これを「初期放流」と呼び、ダム下流においては、これまで一定であった水位が上昇するため、危害を生じる恐れがある。このため、標準的には初期放流の１時間前には、都道府県知事、市町村、警察等に、初期放流の時刻および放流量または上昇水位の見込みを通知しなければならない（標準操作規程第 14 条）。かつ、水位上昇の 15 分前を標準として、サイレン、警報車の拡声器による警告などにより、入川者等の一般への周知を行うことが必要である（同第 15 条）。さらに流入量の増加が想定された場合、流入量よりも放流量を多くして予備低下を開始するが、このように放流量が大きく増加する場合にも、初期放流の場合と同様に、事前に関係箇所への通知、一般への周知を行わなければならない。これら関係箇所への通知および一般への周知が、河川法第 48 条に定められた「危害防止のための措置」である。

つぎにダム流入量が洪水量に達する前に、ダム水位を予備低下水位まで下げる（標準操作規程第 21 条）と共に、洪水量以上においては、流入量に対して一定の遅らせ時間を確保しつつ、放流を行わなければならない（同第 22 条）。流入量がピークとなった後には、流入量に応じて自流放流操作を行い、洪水量以下となった以降、２山目の洪水に備えるために予備低下を行う（同第 23 条）。

これらの操作を行いつつ、水位、流量等の観測（河川法第 45 条）、記録の作成等（河川法第 49 条）、を行うとともに、洪水発生中は、雨量、水位、流量、ゲート操作状況等を１時間毎を目安に、河川管理者、関係都道府県知事に通報することが必要である（河川法第 46 条）。

（流水の貯留の最高限度）
第10条　貯水池における流水の貯留は，第22条第1号の規定により貯水池に流水を貯留する場合を除くほか，常時満水位をこえてしてはならない．

（ダムから放流することができる場合）
第11条　ダムの洪水吐からの放流は次の各号の一に該当する場合に限り，ダムの放流管からの放流は第1号，第4号又は第5号に該当する場合に限り，それぞれすることができるものとする．
(1) 下流における他の河川の使用のため必要な河川の流量を確保する必要があるとき．
(2) 前条の規定を守るため必要があるとき．
(3) 第21条第2号，第22条第1号及び第23条の規定により貯水池から放流するとき．
(4) ダムその他貯水池内の施設又は工作物の点検又は整備のため必要があるとき．
(5) その他やむを得ない必要があるとき．

（放流の開始及び放流量の増減の方法）
第12条　貯水池からの放流は，第22条第1号の規定によってする場合を除くほか，下流の水位の急激な変動を生じないように，別図第2に定めるところによってしなければならない．ただし，流入量が急激に増加しているときは，当該流入量の増加率の範囲内において，貯水池からの放流量を増加することができる，

（放流の際の関係機関に対する通知）
第14条　法第48条の規定による通知は，ダムの洪水吐又は放流管からの放流（当該放流の中途における放流量の著しい増加で，これによって下流に危害が生ずるおそれがあるものを含む．以下次条において「ダム放流」という．）の開始の少なくとも1時間前に，別表第1（一）欄に定めるところにより行うものとする．
2　前項の通知をするときは，○○地方建設局長（以下「局長」という，）に対しても，別表第1（二）欄に定めるところにより，河川法施行令（昭和40年政令第14号．以下「令」という．）第31条に規定する当該通知において示すべき事項と同一の事項を通知しなければならない．
3　発電所の放水口からの放流によって下流の水位の著しい上昇が生ずると認められる場合において，これによって生ずる危害を防止するための必要があると認められるときは，前2項の規定の例により通知しなければならない．

（放流の際の一般に周知させるための措置）
第15条　法第48条の一般に周知させるため必要な措置は，ダム地点から○○地点まで（貯水池からの最大放流量が○○m^3/sをこえるときは，ダム地点から××地点まで）の○○川の区間についてとるものとする．
2　令第31条の規定による警告は，別表第2に掲げるサイレン及び警報車の拡声機により，それぞれ次に掲げる時期に行うものとする．
(1) ダム地点に設置されたサイレンによる警告にあっては，ダム放流の開始約○○分前に約○○分間
(2) ダム地点以外の地点に設置されたサイレンによる警告にあっては，ダム放流により当該地点における○○川の水位の上昇が開始されると認められる時の約○○分前に約○○分間
(3) 警報車の拡声機による警告にあっては，前項の区間に含まれる各地点について，ダム放流により，当該地点における○○川の水位の上昇が開始されると認められる時の約15分前
3　発電所の放水口からの放流によって下流の水位の著しい上昇が生ずると認められる場合において，これによって生ずる危害を防止するため必要があると認められるときは，前2項の規定の例により警告しなければならない．

（洪水警戒時における措置）
第21条　洪水警戒時においては，前条第1号から第5号までに掲げる措置のほか，次の各号に掲げる措置をとらなければならない．
(1) 最大流入量その他流入量の時間的変化を予測すること．
(2) 次に定めるところにより，貯水池から放流し，又は貯水池に流水を貯留すること．ただし，貯水池からの放流は，第12条の規定に適合しないこととなるときは，できるだけこれに適合するような方法で行うこと．
イ　洪水警戒時に至った時における貯水位が，予備放流水位をこえているときは，貯水池からの放流を行い，貯水位が予備放流水位に等しくなった時以後においては，流入量に相当する流量の流水を貯水池から放流すること．
ロ　洪水警戒時に至った時における貯水位が，予備放流水位に等しいときは，流入量に相当する流量の流水を貯水池から放流すること．
ハ　洪水警戒時に至った時における貯水位が，予備放流水位を下まわっているときは，貯水池からの放流をしながら，又はこれをしないで貯水池に流水を貯留し，貯水位が予備放流水位に等しくなった時以後においては，流入量に相当する流量の流水を貯水池から放流すること．
(3) その他ダム及び貯水池の管理上必要な措置

（洪水時における措置）
第22条　洪水時においては，第20条第3号及び第4号並びに前条第1号に掲げる措置のほか，次の各号に掲げる措置をとらなければならない．
(1) 次に定めるところにより，貯水池から放流し，及び貯水池に流水を貯留すること，ただし，貯水池からの放流は，下流の水位の急激な変動を生じないため必要な最小限度において，その急激な変動を生じないようにしてすること．
イ　次の順序によりそれぞれ次に掲げる流量の流水を貯水池から放流すること．
（イ）洪水時に至った時以後○○分間においては○○m^3/s
（ロ）（イ）に規定する時間が経過した時から流入量が最大となるまでの間においては，○○分前に生じた流入量に相当する流量
（ハ）流入量が最大となった時（以下「最大時」という．）から流入量と放流量とが等しくなるまでの間においては，最大時における放流量
（ニ）（ハ）に規定する時間が経過した時から洪水時が経過するまでの間においては，流入量に相当する流量
（ホ）（ニ）に規定する場合において流入量が再び増加を始めたときから○○分間においては，増加を始めた時の放流量
（ヘ）（ホ）に規定する時間が経過した時以後においては，（ロ），（ハ）及び（ニ）の順序で，それぞれ各号の規定による放流量
ロ　イの規定にかかわらず，洪水時に至った時における貯水位が予備放流水位を下まわっているときは，貯水池からの放流をしながら，又はこれをしないで貯水池に流水を貯留し，貯水位が予備放流水位に等しくなった時からイ（ヘ）に規定する時間が経過するまでの間においては，イの規定の例により貯水池から放流すること．
ハ　イ（ヘ）に規定する時間が経過した時以後においては貯水池からの放流をしながら，又はこれをしないで貯水池に流水を貯留すること．
(2) 法第49条の規定による記録の作成をすること．
(3) その他ダム及び貯水池の管理上必要な措置

（洪水処理時における措置）
第23条　洪水処理時においては第21条に規定する措置のほか，次の各号に掲げる措置をとらなければならない．
(1) 洪水処理時に至った時において前条第1号イの規定に基づき，放流していた流量を継続し，すみやかに貯水位を予備放流水位に等しくなるように努めること．
(2) 洪水処理時に至った時において，貯水位が予備放流水位に等しい場合においては，流入量に相当する流量を放流すること．

図-1.2.4　標準操作規程の条文の例（第１類ダムの場合）

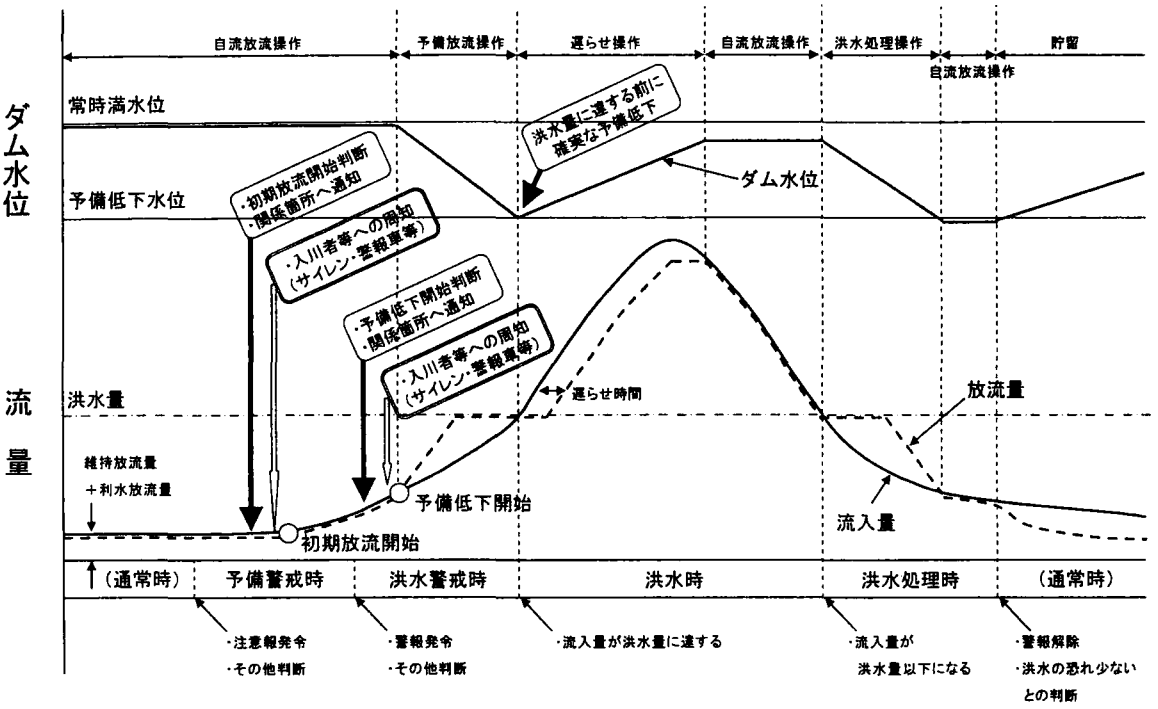


図-1.2.5　出水時におけるダム操作の一例（第１類ダムの場合）

ダム管理者には、いわゆるダム災害を引き起こすことがないよう、刻一刻と変化する自然状況に的確に対応しながら、この操作規程を遵守してダム操作を行う義務がある。

なお、第２類ダム、第３類ダムにおいては、ダム流入量が洪水量に達した以降の遅らせ操作の必要はなく、流入量と放流量を等しくして自流放流を行えばよいが、第１類ダムと同様に、流入量が洪水量に達する前にダム水位の予備低下を実施し、かつ通知・通報等を行うことが必要である。

１．２．４　ダムに関わる社会的紛争

ダムの操作が下流河川の流況に大きな影響を与えるのは自明である。そのため、ダム管理者の瑕疵の有無に関わらず、ひとたびダムの下流において水害等が発生した場合には、被害を受けた地域住民等との間において訴訟等の社会的紛争に発展することがある。表-1.2.2 にダムの設置および管理に関する訴訟の事例を示す。

例えば、和歌山県日置川においては、1990 年 9 月の台風 19 号にともなう出水によって、冠水等の被害をうけた地域住民の一部が、被災地上流に位置する殿山ダムの操作に起因するものであるとし、ダム管理者である関西電力、河川管理者である和歌山県に対し損害賠

表-1.2.2　ダムの設置および

ダム名（所在地）	事業者（目的*）	被告	事件概要	提訴・控訴・上告年月日	
鶴田ダム[8]（鹿児島県）	国交省（FP）	国	1972.7.6 日、鹿児島県川内川流域において、家屋が多数流出するなどの災害が発生し、これは川内川中流部にある鶴田ダムでの洪水調節容量の不足とダム操作ミス等によるものだとして、沿川住民が訴えた。	提訴	
				控訴	（原告）
				上告	（原告）
厚東川（ことうがわ）ダム[8]（山口県）	山口県（FNWIP）	山口県	1972.7.11～12 の集中豪雨により家屋の浸水等の被害を受けた一住民が、この被害は約 2km 上流に設置されている厚東川ダムの誤った操作等、ダム管理の瑕疵によるものであるとして、国家賠償法に基づき山口県に対し、293 万円余の損害賠償を求めて提訴したもの。	提訴	1972.8.26
				控訴	（被告）
新成羽川（しんなりはがわ）ダム[8]（岡山県）	中国電力（IP）	国 中国電力	1972.7 豪雨により、成羽川の水位は 7 月 11 日と 12 日の二度、極大に達し成羽川の氾濫により、高梁市、成羽町等が洪水に見舞われ、住居等に大きな被害がもたらされた。沿川住民ら（総数 1549 名）は、この被災は、新成羽川ダムにおけるダム操作にミス等が原因であるとして、1972.10 から 1975.7 にかけ 6 次に渡り、総額 19 億 3480 万円の損害賠償を求めていたもの。	提訴	1972.10～1975.7
				控訴	1987.8.20（原告）
長安口（ながやすくち）ダム[8]（徳島県）	徳島県（FNP）	国 徳島県	1971.8.30 来襲の台風 23 号により、長安口ダム下流の那賀川沿川において浸水被害が発生したが、これは長安口ダムの設置・管理に瑕疵があるとして、住民 64 名が、国および徳島県に対して、国家賠償法第 2 条に基づき総額 1 億 5700 万円の損賠請求を求めたものである。	提訴	
				控訴	（被告）
				上告	（原告）
大迫ダム[8]（奈良県）	農水省（AWP）	国	原告らが被告国に対し、1982.8.1、吉野川において自己または自己の親族が上流にある大迫ダムの放流によって押し流され、うち 7 名が死亡したが、それについて同ダムを管理する被告に責任があるとして、国家賠償法に基づき損害賠償を請求した。	提訴	1982.12.27
				控訴	1988.7.22（被告）
殿山ダム（和歌山県）	関西電力（P）	和歌山県 関西電力	1990.9.19 の台風 19 号襲来に伴う出水により、日置川流域において浸水被害が発生。これは上流の殿山ダムの操作等に起因するものであるとして、被災した住民 66 名他が、ダム設置者である関西電力および河川管理者である和歌山県に対し、1 億 6388 万円の損害賠償を求め、1991.7.17 提訴。	提訴	1991.7.16
				控訴	1996.6.13（原告）
				上告	2001.1.24（原告）
殿山ダム（和歌山県）	関西電力（P）	和歌山県 日置川町 関西電力	1997.7.26 の台風 9 号襲来に伴う出水により、日置川流域において浸水被害が発生。被災した住民 249 名他が、これは上流の殿山ダムの操作等に起因するものであるとしダム設置者である関西電力、河川管理・改修に不備があるとし河川管理者である和歌山県、支川の中楚川および樋門の管理等が悪いとして日置川町に対し、1171 万円の損害賠償を求め、2000.7.21 提訴。	提訴	2000.7.21
出し平ダム（富山県）	関西電力（P）	関西電力	1991 年以降継続して実施している出し平ダムの排砂により漁業被害を受けたとして、黒部川河口以東の海域を漁場とする入善･朝日両町の漁業者 14 名（ワカメ養殖組合 1 団体を含む）が、ダム設置者である関西電力に対し、出し平ダムの排砂差し止めや富山湾のヘドロ除去、漁業被害に対する損害賠償として約 3 億 3 千 5 百万円の支払いを求め、2002.12.4 提訴。	提訴	2002.12.4

* 目的[9]　F：洪水調節・農地防災、N：不特定用水・河川維持用水、

管理に関する訴訟の事例

判決 年月日		判　決　概　要 （○：被告勝訴、△：和解、×：被告敗訴）
1984.3.23	○	一　審：本件洪水については、これまでにない波形および規模の流水により洪水調節機能が事実上失ったものであり、洪水調節方式には合理性があり欠陥はなかったとするのが相当。 二　審：基本的には原審を支持。ダム操作について過放流の事実はない。通知警報が放流開始に先立って行われていたなら、水位上昇後の河川に敢えて立ち入る者があることまでも予想して放流量を増大するごとに所定の警告をなすべき義務はない。 最高裁：本件災害の後に洪水調節容量を増加させているからといってそれ以前に容量を増加させなかったことは不合理であったとは解されない。その他の点についても全面的に原審を支持。
1987.9.30	○	
1993.4.22	○	
1985.5.16	×	・原告の請求を一部認容（102万円）する判決 本件ダムからの放流の際、関係機関に対する通知が、増放流を再開した21時15分以降はなされておらずそれ以前の通知にしても、その内容において放流による下流水位の上昇の見込みあるいは溢水等災害発生の危険性についての情報が含まれていなかった可能性があり、また原告および証人らがサイレンの音を聞いていないこと等から、サイレンの吹鳴および少なくとも増放流を知らせるべき警報車による拡声機放送は行われなったことが推認できる。このことは、本件ダムの管理瑕疵に当たるというべきである。 ＜山口県はこれを不服とし、控訴。＞
（審理中）		
1987.8.7	○	・原告の訴えをいずれも棄却。 ＜原告控訴後、和解＞
（和解）	△	
1988.6.8	×	一　審：国、徳島県に対する1億5700万円の請求のうち2563万円を認容。 ダムの管理、運営に万全を期すためには単に組織体制を整備し、操作規則等によって重要事項を定めておくだけでは足りず、ダムの操作に当たる関係者について日頃から訓練を積ませ、研究を重ねるなどして、実践的な操作技術を体得させることが必要不可欠と解されるところ、本件において、洪水時の過放流を招いたのは、当時、長安口ダムの管理について上の点に欠けるところがあったためとみざるを得ず、長安口ダムには管理上の瑕疵が存した。 二　審：一審判決中、被告敗訴の部分を取り消し。 ダム操作とその前提としての気象、水象状況の予測判断が著しく不合理、不当ということはできない。 最高裁：原審の判断は結論において是認。
1994.8.8	○	
1998.3.27	○	
1988.7.13	×	・放流量の増加率が流入量の増加率より大きな急激な放流であり、ダム設置前の正常な機能を維持せず、操作規程からも逸脱した被告の大迫ダムの管理には、瑕疵が存在したことが極めて強く推認される。 ・被告が行った通知および警報の区間、時期および内容ならびに立札の設置等は極めて不十分なものであり、被告のダム管理の瑕疵は明らか。 ＜被告控訴後、和解＞
（和解）	△	
1998.5.31	○	一　審：原告の請求をいずれも棄却。 ・操作規程に従い適切なダム操作を行い、河川の従前の機能の維持が図れた。 ・河川管理の一般的水準および社会通念に照らして是認しうる安全性を備えていないとは認められない。 二　審：原判決は相当であり控訴人らの控訴はいずれも理由がないとし各控訴を棄却。 最高裁：上告を棄却。
2000.12.22	○	
2002.6.25	○	
2005.3.23	○	原告らの請求をいずれも棄却 ・殿山ダム湖底の土砂堆積物がダム放流に伴い大量に流出し原告らの農作物に被害を及ぼしたと認められず、被告関西電力に対する請求はいずれも理由がない。 ・日置川が河川管理の一般水準および社会通念に照らして是認しうる安全性を備えていないものということはできず、被告県による河川管理に瑕疵があったとは認められない。 ・被告町による中楚川の河川管理および樋門の設置・管理につき、いずれも瑕疵があるとは認められない。
（審理中）		

A：かんがい・特定（新規）かんがい用水、W：上水道用水、I：工業用水道用水、P：発電

償を求める訴えを1991年7月に大阪地方裁判所に提訴した。裁判の争点は、河川の従前の機能が維持されたか、操作規程に違反があったか等であったが、被告である関西電力のダム操作、および和歌山県の河川管理に対して瑕疵はないことが認められ、被告側の勝訴とする判決が確定している。

利水ダム管理者は、既述したダムの操作規程を遵守し、河川の従前の機能の維持および確実な通知・通報等を実施して、ダム管理者としての責務を確実に果たすことが必要である。

１．２．５　電力ダムにおける運用上の課題

利水ダム管理者は、まず第一に関係法令、規程を遵守したダム操作を行い、もってダムの上下流に対してダムが存在することによる悪影響を生じさせないようにしなければならない。そのために、実際にダム操作を行う操作員にとっては、刻一刻と変化する自然状況を把握し、かつ将来の状況変化すなわち将来のダム流入量を予測し、的確な対応をとることが求められている。

自然状況の把握という面においては、様々な観測装置の精度向上、自動配信や直感的理解を考慮したデータ表示方法の工夫などにより、ダム操作員の負担軽減を図ってきたが、自然状況、具体的には、降雨やダム流入量の予測という面においては、ダム操作員の経験的判断に負うところが大きい。このため、精度よく、かつリアルタイムに将来のダム流入量を予測することにより、ダム操作の信頼性を向上すると共に、ダム操作員の負担を大きく軽減することが可能であると考える。さらに、予測結果をダム操作のみに用いるのではなく、一定規模以上の降雨、出水が予測される場合には、当該ダム事業関係者への情報配信や、河川管理者、周辺自治体等へ情報提供などの協力を行うことで、突発的な自然災害の防止、減災も可能になるものと考える。また、電力ダムにおいては、出水が予測される場合には、ゲート放流ではなく、事前に発電でダム水位を下げることにより、より有効に水力資源を利用することも可能になると考える。

１．３　電力ダムを対象としたダム流入量予測に対する要請

河道の水の流れは、複雑な水循環過程の一部である。ある河川の流域内への降水は、その一部は地面に浸透し地下へ、また一部は河道に直接流出し、残りは蒸発散する。河道の流れは、途中で斜面からの流出分である直接流出や地下水からなる基底流出を集めながら、重力に従い高所から低所に流れ、最終的に海へ流れ込む。さらに、海洋からも多くの水分が蒸発し大気へ戻っていく。陸上から、もしくは海上からの水蒸気は、やがて大気中で凝結して雲粒となり、これが成長すると降水となって再度地上へ達する。

ダム流入量を予測するためには、上記の水循環過程のうち、河道への流れの源となる降水の過程、その降水が河道へ流出する過程、さらには河川水が河道を流下する過程を再現する必要がある（図-1.3.1）。すなわち、「降雨予測」と「流出予測」を精度良く実施しなければならない。

本節では、この降雨予測と流出予測の現状について述べる。

１．３．１　降雨予測に関する現状 [11), 12), 13), 14), 15)]

日本において、1993 年の気象業務法の改正以前、一般に提供する気象予測は気象庁によって独占的に実施されてきた。したがって、気象予測技術の発展は気象庁によるところが

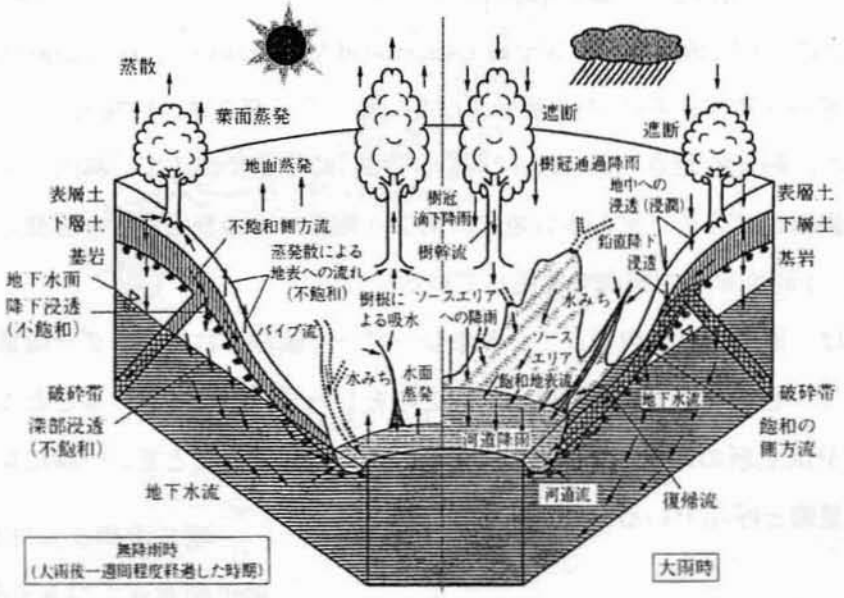


図-1.3.1　斜面と河道の水の流れ [10)]

大きい。ここでは、気象庁を対象として、まず雨の観測手法について概説した後、降雨予測の現状を紹介する。

（１）雨の観測

気象庁による雨の観測は、20 箇所に配置された気象レーダーによる面の観測（図-1.3.2）と、約 1,300 地点におよぶ地上雨量計による点の観測（図-1.3.3）の組合せで実施されている。

気象レーダーは、アンテナからマイクロ波を発射し、大気中を落下する雨滴からの後方散乱波を受信し、そのエコー強度から雨や雪の量を判定し、さらにその送信と受信までの時間から雨や雪までの距離を算出している。気象レーダーが発射するマイクロ波は空中を直進する性質があるため、その進路に建物や山などの障害物があると雨や雪が観測できない。したがって、遠くまで観測できるよう気象レーダーは障害物の少ない山頂や鉄塔上に設置され、全国をカバーできるように配置されている。また、大気中の水蒸気や降水粒子によって電波が減衰するため、エコー強度が小さくなってしまう。この減衰は、電波の波長が小さいほど大きくなるので、減衰の影響を小さくするためには大きな波長の電波を用いればよいことになる。一方、波長が小さい電波ほど探知能力が優れている。気象庁の気象レーダーは、これらの事情を考慮して、通常は減衰の問題が生じないとされる C バンド（約 5cm）の波長、送信周波数に換算すると 5.3GHz のものが用いられている。気象レーダーは、時間的にも連続して観測することができる。

地上雨量計は、地域気象観測システム（Automated Meteorological Data Acquisition System : AMeDAS、通称「アメダス」）の一部をなしている。アメダスは、1974 年 11 月 1 日から運用を開始した。約 850 地点（約 21km 間隔）では、降水量に加えて、風向・風速、気温、日照時間を観測しており、雪の多い地方の約 280 地点では積雪の深さも観測している。地上雨量計は、1 時間単位で観測を実施している。

気象庁では、地上雨量計設置点で、気象レーダーで観測されたレーダー雨量と地上雨量計観測値の比率をレーダー雨量係数とし、これをレーダー雨量に乗じることで、2.5km メッシュ、10 分間更新の雨量図を配信している。この雨量図のことを、一般にレーダーアメダス解析雨量図と呼んでいる。

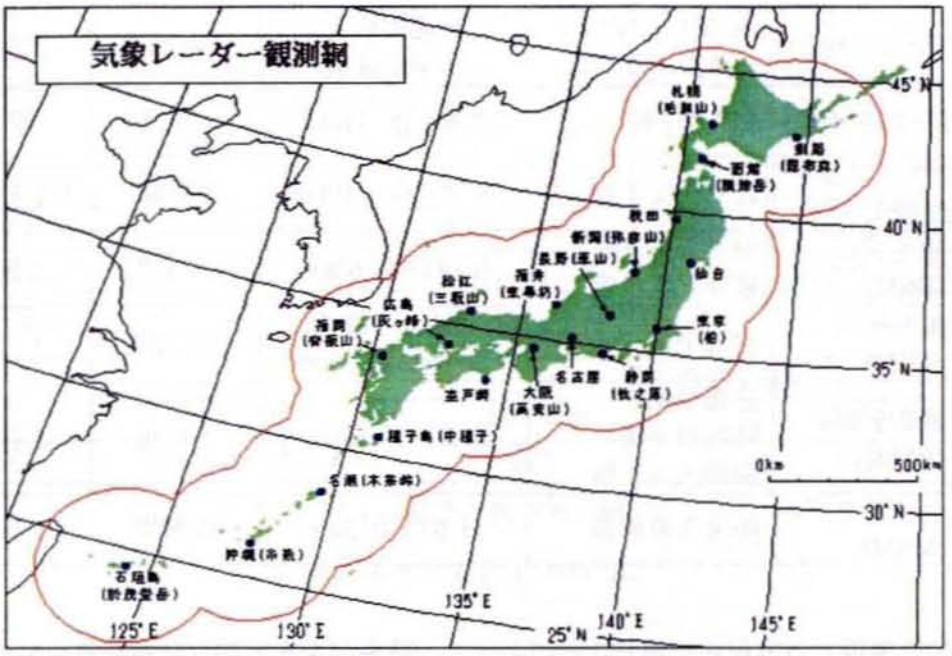


図-1.3.2　気象庁の気象レーダー観測網 [13)]

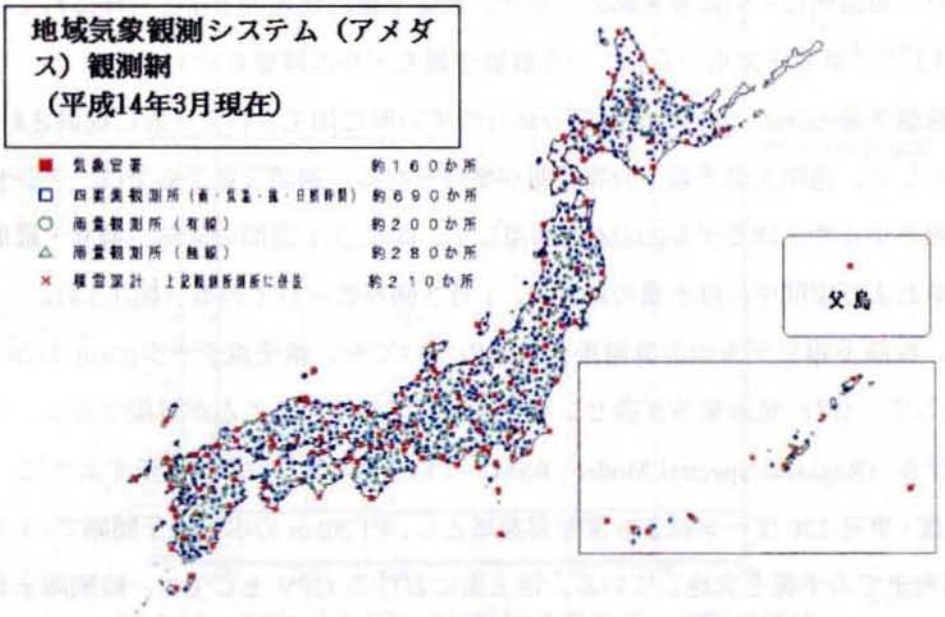


図-1.3.3　気象庁のアメダス観測網 [13)]

（２）気象庁による降雨予測

①数値予報モデルによる降雨予測

気象庁から提供される気象予報の多くは数値予報により行われている。数値予報とは、大気の力学的要素である気温、気圧、水蒸気量、風向、風速などの変数を、これらの関係

表-1.3.1　気象庁の数値予報モデルの概要[13)]

予報モデルの種類	モデルを用いて発表する予報	予報領域と水平解像度	予報期間	実行回数
1か月予報モデル	1か月予報	地球全体 110km	1か月	週1回
アンサンブル週間予報モデル	週間天気予報	地球全体 110km	9日間	1日1回
全球モデル (GSM)	府県天気予報 週間天気予報	地球全体 60km	～9日間	1日4回
台風モデル (TYM)	台風予報	北西太平洋の台風周辺 24km	3.5日間	1日4回
領域モデル (RSM)	分布予報 時系列予報 府県天気予報	東アジア 20km	2日間	1日2回
メソスケールモデル (MSM)	防災気象情報	日本周辺 5km	15時間	1日8回

を物理的に表現する方程式を解くことによって、将来の3次元的な分布を算出するものである。これらは、スーパーコンピュータに代表される計算機技術の進歩と観測データの拡充により、飛躍的にその精度を高めてきた。数値予報は物理的手法とも呼ばれている。

表-1.3.1に、気象庁で用いられている数値予報モデルの概要を示す。

この数値予報モデルの計算結果は、分かりやすい形に加工されて一般に提供されている。その例として、週間天気予報や分布予報が挙げられる。週間天気予報では、アンサンブル週間予報モデルや全球モデル(GSM)を利用して、向こう1週間の天気、最高・最低気温、降水確率および期間中の降水量の合計が、1日2回発表されている（図-1.3.4)。

また、数値予報モデルの計算結果そのものついても、格子点データ(Grid Point Value : GPV)として、（財）気象業務支援センターを通じて利用することが可能である。例えば、領域モデル（Regional Spectral Model : RSM）では、図-1.3.5の緑枠に示すように、北緯20度～50度・東経120度～東経150度を対象域とし、約20kmの水平格子間隔で、1日2回、51時間先までの予報を実施している。地上面におけるGPVとしては、時間降水量だけではなく、海面更正気圧、風、気温、相対湿度および数値予報雲量が出力される。また、メソスケールモデル（Meso Scale Model : MSM）では、北緯22.4度～47.6度・東経120度～150度（図-1.3.5の青枠）を対象域として、約5kmの水平格子間隔で、1日8回、15時間先までの予報を実施している。地上面におけるGPVとしては、RSMと同様、時間降水量のほかに、海面更正気圧、風、気温、相対湿度および数値予報雲量が出力される。

日付		7 金	8 土	9 日	10 月	11 火	12 水	13 木
大阪府		曇のち 時々晴	曇時々晴	晴時々曇	曇	曇一時雨	曇時々晴	曇
降水確率(%)		20/20/10/0	30	20	40	60	30	40
大阪	最低(℃)	7 (-)	10 (±2)	5 (±2)	7 (±4)	11 (±4)	12 (±4)	13 (±4)
	最高(℃)	15 (-)	16 (±4)	16 (±3)	17 (±4)	18 (±4)	21 (±4)	21 (±4)
日別信頼度		／	／	A	B	B	B	C

平年値	降水量の合計	最高最低気温	
		最低気温	最高気温
大阪	平年並 20 - 36mm	9.5℃	18.5℃

図-1.3.4　週間天気予報の例 [13)]

（2006 年 4 月 6 日 17:00 時点）

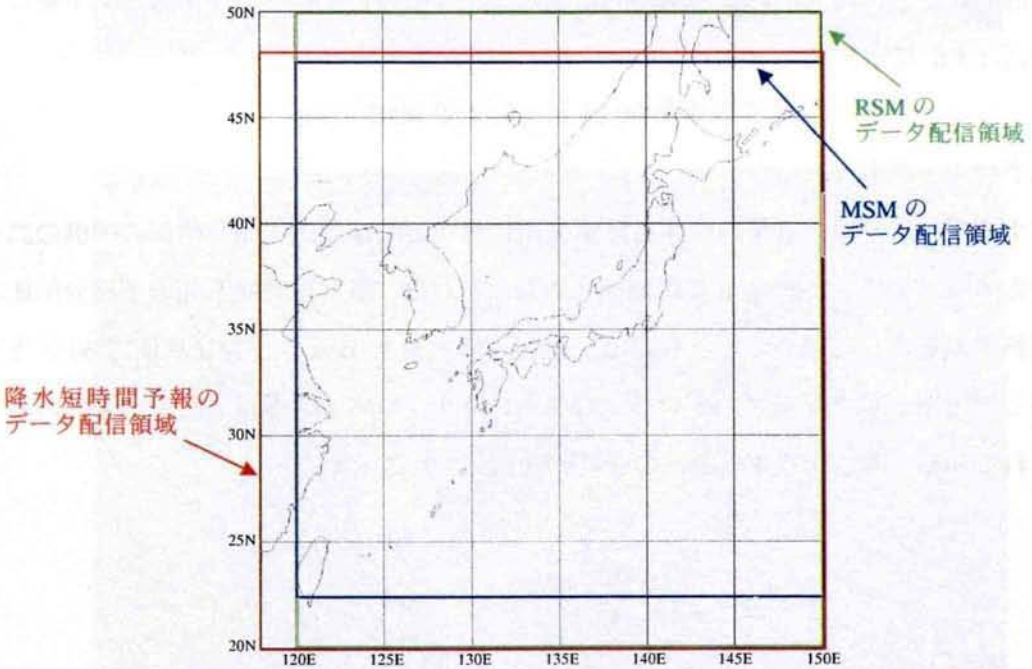


図-1.3.5　GPV および降水短時間予報のデータ配信領域

②降水短時間予報

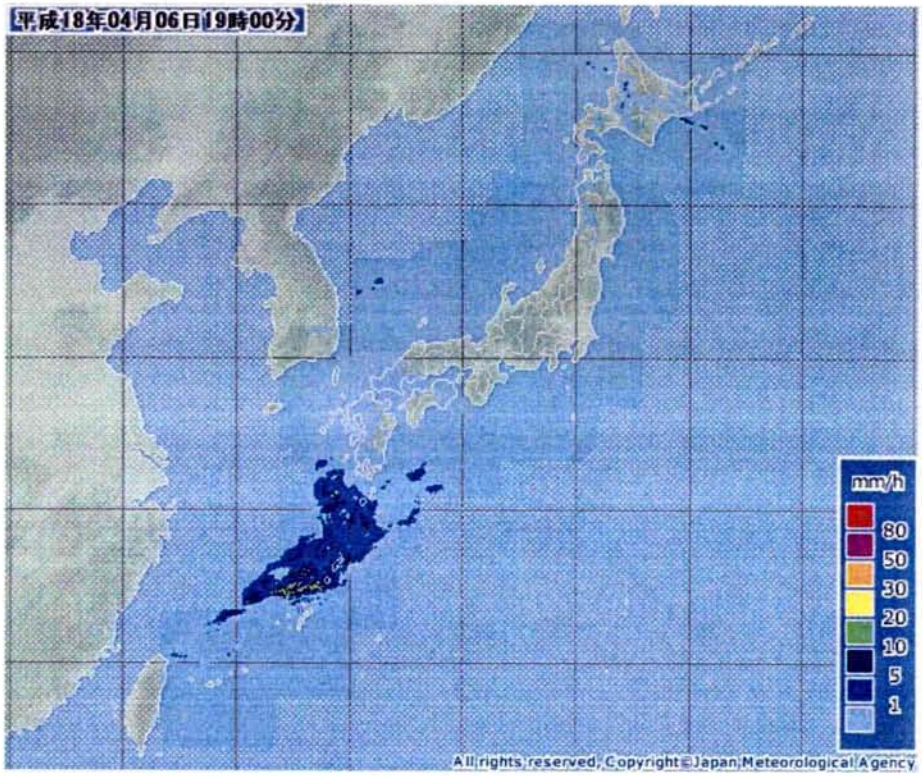
降水短時間予報は、図-1.3.5 の赤枠の領域について、1 時間降水量を 1km メッシュ単位で 6 時間先まで予報するものである。この予報は、毎正時 00 分および 30 分を初期時刻として発表されている。

この降水短時間予報は、数値予報モデルの一つである MSM モデルと実況の補外の組み合わせで計算されている。実況の補外とは、気象レーダーや気象衛星情報から降水強度の現況を推定し、降水強度分布の時間変動パターンを時間的に外挿するものであり、運動学的手法とも呼ばれる。

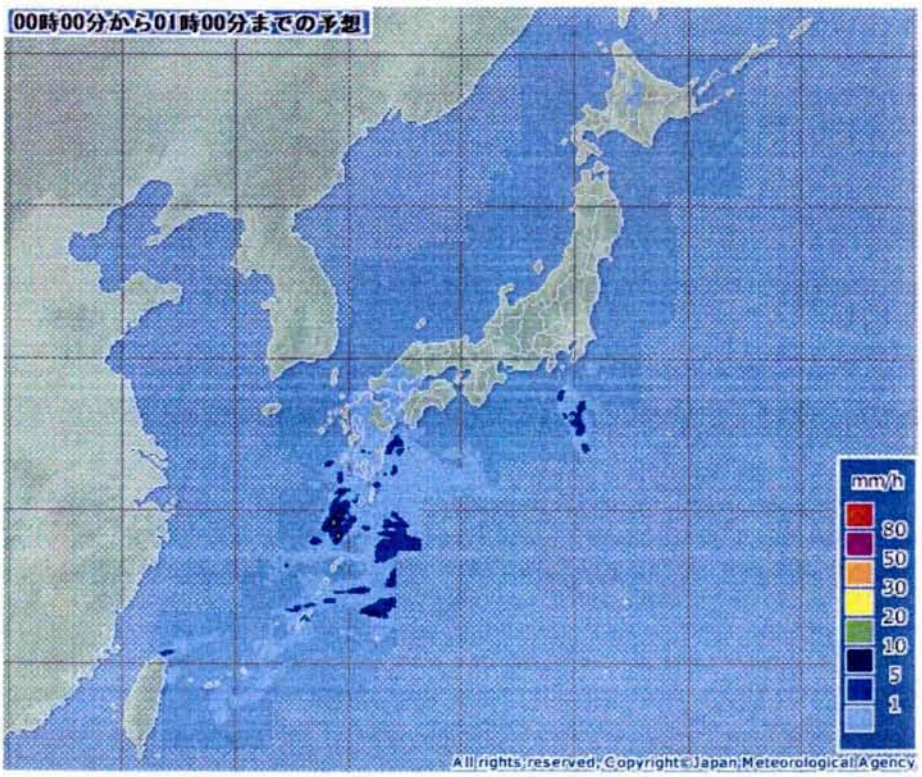
MSM モデルと実況の補外を組み合わせている理由は、降水量の予測に最適な手法がリードタイムにより異なるためである。例えば、2～3 時間先までの予報では、大気の状態が大きく変化することはないので、実況の補外により、比較的高い精度の予報が可能となる。しかし、これよりも長いリードタイムの場合、急速にその精度が低下してしまう。一方、6 時間先以降では、数値予報モデルのほうが実況の補外よりも再現性が高く、またリードタイムがさらに長くなってもその精度はあまり変化しない。残りの 3～6 時間の間はどちらのモデルの精度も一長一短である。したがって、降水短時間予報では、リードタイムに応じて MSM モデルの予測結果と実況の補外による組み合わせ比率を、3 時間前の予測結果に応じて随時決定し、時間的および空間的に結果として出力している。降水短時間予報の予測例を図-1.3.6 に示す。

③降水ナウキャスト

降水ナウキャストは、近年頻発する集中豪雨に対する的確な防災気象情報の提供のニーズに対応するために、2004 年 6 月に開始された。これは、降水短時間予報の予測分解能および更新間隔をさらに細かくしたもので、10 分間降水量を 1km メッシュ単位で 60 分先まで予測し、10 分間隔で更新されている。なおこの降水ナウキャストは、実況の補外のみで予測されている。降水ナウキャストの予測例を図-1.3.7 に示す。

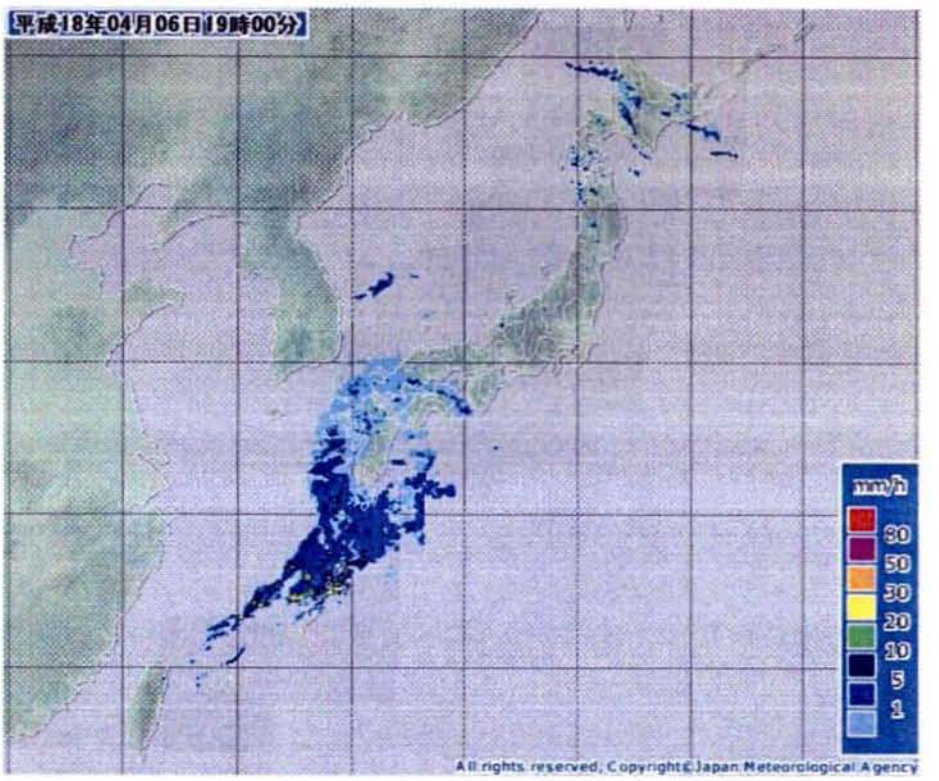


(a)　2006 年 4 月 6 日 19:00 時点の実況

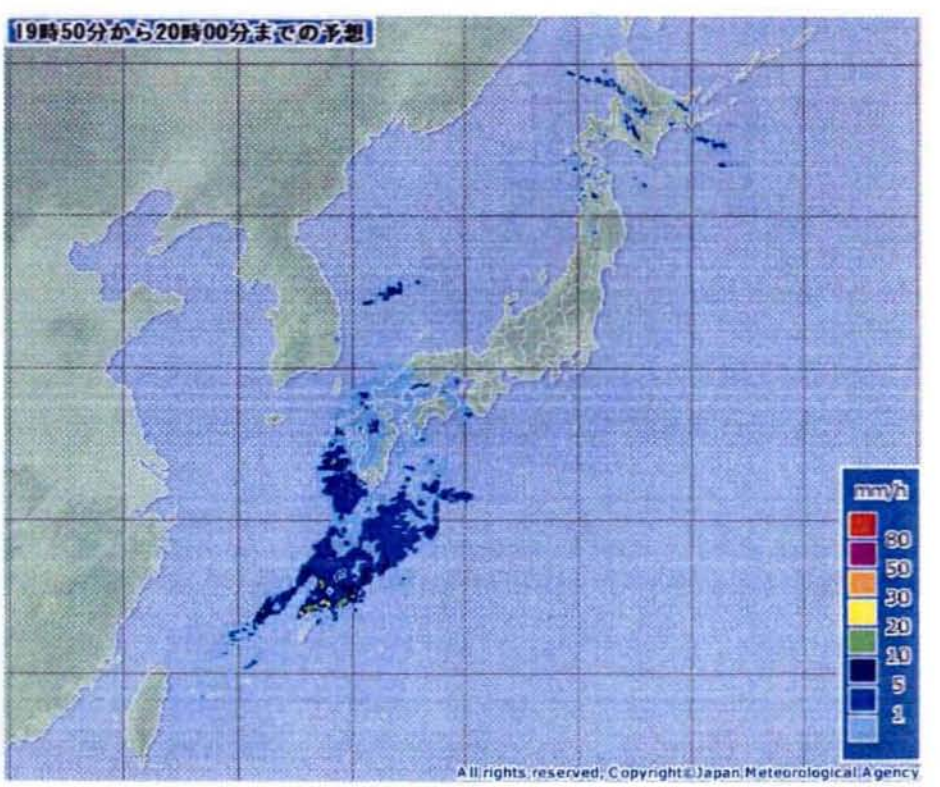


(b)　6 時間先の予測

図-1.3.6　レーダー解析雨量および降水短時間予報の例 [13)]



(a)　2006 年 4 月 6 日 19:00 時点の実況



(b)　1 時間先の予測

図-1.3.7　降水ナウキャストの予測事例 [13)]

１．３．２　流出予測に関する現状[16),17)]

河川水文学において、流域の降水量と河道の流量の時系列での関係を求める流出解析は古くから研究されてきた。特に、河川管理もしくはダム管理の観点からは、時々刻々と変化する洪水波形をリアルタイムで予測することが要求される。

この目的のために種々の流出モデルが開発されており、空間的な構成方法からみると、集中型モデルと分布型モデルに大別される。ここでは、洪水波形を予測するこれら代表的な流出モデルの事例を紹介する。

（１）集中型モデル

集中型モデルとは、ある対象地点の流量を予測するにあたって、その上流域を一つ（もしくは少数）の単位で平均化してモデル化するものである。したがって、この流出モデルへの入力変数は、その流域の有効雨量の代表値である。これらのモデルは、降雨から流出への変換過程を概念的に表現していることから、概念モデルとも呼ばれる。

集中型モデルは、モデルの構造が単純であるため、計算時間を短くすることができる。さらに、適切にモデルのパラメータを推定することができれば、比較的精度良く河道の流量を予測できる。このことから、リアルタイムでの予測モデルとして、これまで数多く利用されてきている。

①貯留関数法

貯留関数法は、流域内の貯留能力を示す貯留量を媒介として、降水量と河道の流量の関係を決めるものである。まず、降水による流域内の貯留高と河道への流出高に、以下の関係式が成立すると仮定する。

$$s = f(q) \tag{1.3.1}$$

さらに、連続式として、

$$\frac{ds}{dt} = r_e(t - T_L) - q \tag{1.3.2}$$

$$r_e = f \cdot r \tag{1.3.3}$$

ここに、

s ：　貯留高 (mm)

q ：　直接流出高 (mm)

r_e ：　有効降雨強度 (mm/hour)

f ：　流出率

r ：　観測降雨強度 (mm/hour)

T_L：　洪水の遅滞時間 (hour)

貯留関数法は、流出現象の非線形性を比較的単純な形で表現できることから、これまで実務で多く用いられてきている。

②タンクモデル

タンクモデルは、流域を図-1.3.8 のようなタンクでモデル化したものである。雨が上方からタンクに注ぎ込まれ、下方の孔からの流出を河道への流出とする。孔は、下方だけでなく側方にも設けられ、それぞれ固有の大きさを有し、孔が大きいとその孔からの流出も大きくなる。流出孔の個数、位置、大きさなどは、最も河道の流量が再現されるように決定される。また、一般には、タンクを複数個、直列に重ねた構造のものが用いられる。

図-1.3.8 において、

$$h(t+\Delta t) = r(t+\Delta t) + \{h(t) - \sum_{i=1}^{n} q_i(t) - \beta \cdot h(t)\} \tag{1.3.4}$$

$$q_i(t) = \begin{cases} 0 & h(t) \le Y_i \\ \alpha_i \cdot \{h(t) - Y_i\} & h(t) > Y_i \end{cases} \tag{1.3.5}$$

$$Q(t) = \sum_{i=1}^{n} q_i(t) \tag{1.3.6}$$

ここに、

$h(t)$ ：　時刻 t におけるタンクの水深

$r(t)$ ：　時刻 t における観測降雨

$q_i(t)$：　時刻 t における i 番目の流出孔からの流出高

Y_i ：　i 番目の流出孔の高さ

$Q(t)$ ：　時刻 t における流域からの流出高

α_i ：　i 番目の流出孔の係数

β ：　下方への浸透を表わす浸透孔の係数

Δt ：　計算時間間隔

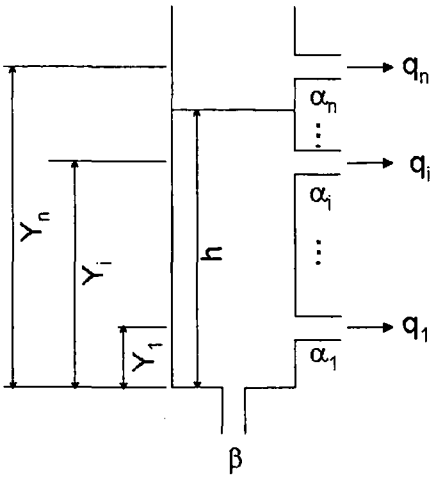


図-1.3.8　タンクモデルの説明図

タンクモデルは、その流域に適する孔の数と高さ、それらの係数を同定するのに、試行錯誤によるのが一般的であり、この作業には若干の熟練技が必要である。しかし、いったん適切なパラメータを同定できれば、モデルの構造が単純明快であることから誰にでも解析可能であり、貯留関数法と同様に実務で多用されている。

（２）分布型モデル

分布型モデルは、降水が地表面に到達した後、河道へ直接流出したり、地面に浸透してから河道へ流出したりする様子を、流域を同一とみなせる単位まで詳細な要素に分割することで流出機構を解析するものである。降雨から流出への変換過程を物理的な法則に基いて忠実に表現しようとすることから、物理モデルとも呼ばれる。

分布型モデルは、流域の地形、水の流れの力学的挙動、土壌特性の空間分布、降雨の空間分布を陽に考慮することで、より精度の高い流出予測を目指すものである[18]。従来、これらの空間的な分布の情報は実在せず利用不可能であったこと、およびリアルタイムでこのモデルを解析する計算機能力が不足していたことなどから、分布型モデルは、なかなか実用に供されることはなかった。

しかし、近年、位置や空間に関する情報をもったデータを総合的に管理・加工し、視覚的に表示できる高度な分析や迅速な判断を可能にする地理情報システム(Geographic Information System : GIS)が急速に整備されてきている。国土交通省国土計画局からは、地形、土地利用、公共施設、道路、鉄道など国土に関する様々な地理的情報をメッシュ単位で数値化した国土数値情報が公開され、一般に利用できるようになってきた[19]。同時に、前項で述べたように、レーダーアメダス解析雨量図などによる降雨の実況観測と、それを

利用した降雨予測が、メッシュ情報として気象庁よりリアルタイムで提供されるようになった。

したがって、分布型モデルを用いてリアルタイムで流出解析する環境は整ってきているといえる。

１．３．３　リアルタイムのダム流入量予測に関する既往の事例

ダム管理者にとって最も重要な業務の一つとして、出水時に適切に流入水を処理することが挙げられる。河川管理者が管理するダムは河川法第 14 条による「操作規則」に基いて、電力ダムをはじめとする利水ダムは河川法第 47 条による「操作規程」に基いて、それぞれダムを運用、操作する。このとき、時々刻々と変化する気象および流入状況に対して細心の注意を払う必要がある。このため、ダム管理者は、古くから降雨予測手法、流出予測手法の開発を試みてきた。

本項では、リアルタイムでダム管理の実務に供されている事例のいくつかを紹介する。

（１）降雨予測

気象庁による降雨予測は、最新の科学技術の成果を取り込み、逐次改良されてきている。例えば、モデルの精緻化による予測精度の向上、平面的、時間的に高分解能化した気象データの配信、降水ナウキャストをはじめとするきめ細やかな気象予測の開始などである。しかし、ダム管理において必要な流域単位というローカルな視点で見たとき、予測精度や配信間隔、必要とする気象情報などの点で、ダム管理者のニーズに合致しないことがある。このため、ダム管理者が気象庁から配信される予測を独自に修正して用いているケースが見られる。

例えば、垣見ら [20]は、阿賀野川水系にある 11 のダム群を適切な管理に供するため、この流域を対象とした 3 時間先までの降雨予測手法を開発している。当時、気象庁から配信されている数値予報モデルは、RSM が最も精緻なモデルであり、約 20km の格子間隔について、1 日 2 回の頻度で 51 時間先までを予測するものであった。このとき、約 20km の格子間隔では、越後山脈に相当する平坦な山岳地形が表現されているだけで、阿賀野川流域内の奥只見山系や磐梯山系、会津盆地は全く表現されておらず、降雨を予測する際の重要なファクターである流域内の気流の流れを解析するには、精度的に不十分であることが判明したため、まず、1 次修正として、以下の補正を実施している。

① RSMによる20kmメッシュのGPVデータ（気圧、風、気温、湿度）を、2kmメッシュに内挿して変換する。

② Shermannによって提案されたマスコンモデルにより、2kmメッシュ地形上の風速の3次元分布を算出する。

③ ①で得られた2kmメッシュのGPVデータ（気圧、気温、湿度）と、②で得られた2kmメッシュの3次元風速を用い、水蒸気の斜面移流量を計算し、2kmメッシュ単位の降水量を計算する。

つぎに、大気の状態の不安定や積乱雲などによる局所的な大雨を再現できるようにするために、阿賀野川流域に近い4地点（輪島、館野、秋田、仙台）の高層気象データなどから降雨に関係する予測因子を選定し、その予測因子と降水量との相関式を作成し、この相関式により、1次修正された2kmメッシュ単位の降水量を2次修正している。さらに、3次修正として、阿賀野川流域内の35箇所で計測された地上雨量と気象レーダーで観測されたレーダー雨量を用いて、上記の2次修正で得られた降水量の時間的、空間的なずれを補正している。この結果、全般的に予測精度は改善されているが、依然として大気の状態が不安定な時の予測降水量が、実況降水量と比較して少なく算出されるなど、さらに改良が必要であると結論付けている。

また、向原ら[21]は、気象庁から配信される予測雨量の精度をさらに改善するために、独自でドップラーレーダーを熊本・宮崎県境に位置する江代山に設置し、そのデータを用いて、1時間先までの降雨予測手法を開発している。このドップラーレーダーは、山岳域の複雑な降雨分布にも対応できるXバンド（波長3cm）のものを用いており、10分毎に1kmメッシュの雨量分布が算定できるようにしている。降雨予測手法は、雨域の移動や変形を移流方程式により算出する移流モデルを採用している。その結果、移動性低気圧のような層状性雲による降雨は比較的精度よく予測できている。逆に、激しい対流性降雨については、移流モデルが物理的な降雨の生成過程のプロセスを考慮していないため、その降雨の発達や衰弱を適切に予測できず、良好な精度は得られていない。一方、ドップラーレーダーは、そのドップラー機能を利用して風速場の観測が可能である。新たに開発した拡張VVP(Volume Velocity Processing)法により、水平風速場および下層風速の収束発散場を算出し、これと降雨の発達や衰弱に関連性があることを見出している。この結果、今後、移流モデルにこの物理的な概念を組み込んだ予測手法を検討したいと結論付けている。

これらの降雨予測に関する研究をみると、いずれも、ダムが位置する山岳域の特徴である局所的な豪雨の予測に課題を残していることがわかる。

（２）流出予測

流出予測に関して、その予測手法の一つである貯留関数法は、少数のパラメータで流出モデルを構築できることから、容易に他地点に展開できる。したがって、（財）河川情報センターをはじめとして、複数の機関から貯留関数法による流出モデルのソフトウェアパッケージが開発されており、実際のダム管理に利用されている。

一方、実用的で概念的に理解しやすい集中型モデルの特性と、降雨や地形の空間分布を考慮できる分布型モデルの特性を組み合わせた、分布型タンクモデルを利用して流出予測した事例が見られる。

本田ら [22]は、大井川水系寸又川にある千頭ダム（流域面積 132km^2）を対象として、旧建設省土木研究所で開発された分布型タンクモデルを利用し、3 時間先までを対象とするリアルタイムでの流入量予測システムを構築している。入力とする降雨予測データとして、（財）日本気象協会から 2.5km メッシュ、10 分間更新で配信される短時間降雨予測データを基に、独自の雨量観測データを加えて補正したものを用いている。分布型タンクモデルは、3 層（表層、不飽和帯、地下水）のタンクモデルと河道モデルから構成されており、タンクモデルのメッシュサイズは 0.5km としている。予測精度としては、ピーク発生時刻の予測精度は高く、洪水警戒体制に向けた人員確保の判断に利用可能性を見出しているが、２時間先以上では、ピーク流入量の予測精度に課題を残している。

１．３．４　電力ダムを対象としたダム流入量予測に関する要請

一言で適正なダム管理といっても、これを具現化するために実施すべき項目は数多い。本項では、電力ダムを対象とした場合に、適正なダム管理のためにダム流入量予測がなぜ必要なのかを整理する。

（１）ダム操作信頼性の向上 [23), 24)]

前節で述べたように、利水ダムの管理者は、従前の河川の機能を維持し、ダムからの放流によって下流の流況を著しく変化させる恐れのある場合の関係機関への通知ならびに一般へ周知するための措置を行うなど、「操作規程」を遵守してダムを操作しなければならない。例えば、予備放流方式の場合、ダム水位を予備放流水位まで低下させるのに必要な時間以上のリードタイムを持ってダム流入量を予測し、放流開始の一定時間前に、関係機関への通知ならびに一般へ周知するための措置をとらなければならない。

すなわち、ダム流域に被害を発生させることなく確実にダム操作を実施するためには、事前に放流開始時間の的確な判断が必要となる。従来、この判断は、ダム操作員の経験によって得られたいわゆるノウハウ、職人的な勘などに相当依存してきた。しかし、より信頼性の高いダム操作を継続的に実施するためには、精度の高い流入量予測システムの導入が望まれる。

（２）災害への対応

電力ダムは、発電のエネルギー源として水の位置エネルギーを利用することから、一般に人里離れた急峻な山岳地帯に位置することが多い。このような急峻な山岳地帯では、時間的、空間的に降雨強度が激しく変動する。このため、ダムへの流入量予測が難しいだけでなく、ひとたび局地的な豪雨になると、地理的な隔絶性から、ダム操作員や関連施設の保守関係者の安全に大きな影響を与えることとなる。

さらに、近年、流域住民の防災意識の高まりと相まって、災害時の避難および通常時の河川利用などの判断情報とするために、雨量や河川水位など河川管理に資する多様な情報の提供を求めるニーズが強まっており、これは電力ダムをはじめとする利水ダム管理者に対しても同様なものとなっている。

これらの災害に対する地域への情報提供の観点からも、信頼性の高い流入量予測システムが必要になってきている。

（３）出水時の体制確保

前述したとおり、洪水時においては、複雑な洪水吐ゲートの操作のみに限らず、関係機関への通知ならびに一般へ周知するための措置など、実施すべき項目が多岐にわたる。このため、通常時にはダムに必要最低限度の人員のみを配置しておき、洪水が予測される都度、必要な追加要員を派遣するケースが多い。

この体制確保のためにも、高精度の流入量予測システムが求められている。

（４）最適発電運用

一般に、ダムの貯水容量や発電所の最大使用水量は、費用対効果の観点から、その地点の河川流量のすべてを利用するように決定されることはない。したがって、どの発電ダムでも、発電に利用できずダムから無効に放流される水量、すなわち溢水が存在する。

もし、ダム流入量が精度良く予測できるとすれば、出水前に発電でダムの水を使い込ん

で水位を下げておき、出水時の溢水を低減させることが可能である。

この最適発電運用にためにも、精度の高い流入量予測システムは有用である。

１．３．５　黒部川水系におけるダム流入量予測の必要性

本研究では、山岳域における高精度のダム流入量予測システムを実用化することを最終的な目的とするが、研究対象とする具体的なフィールドとして、黒部川を選定することとした。

黒部川は、富山県富山市と長野県大町市の境にある鷲羽岳（標高 2,924m）にその源を発し、3,000m 級の山岳が連座する立山連峰と後立山連峰の間に黒部峡谷を刻み、数多くの渓流を合せながら北流し、黒部川扇状地を経て日本海に注いでいる、河川延長 86km、流域面積 682km^2 の一級河川である。黒部川は、平均勾配 1/40、源流から中流域にいたっては 1/20～1/35 という日本有数の急流を構成している。また、この付近は、年間降水量が 4,000mm を超えるという稀に見る多雨多雪地帯である [25)]。

図-1.3.9 に示すように、この黒部川には、関西電力が、上流側から、黒部ダム、仙人谷ダム、小屋平ダム、出し平ダムの 4 ダムを保有している。また、出し平ダムの下流約 7km の地点には、国土交通省が管理する特定多目的ダムである宇奈月ダムが存在する。

黒部川水系は、その豊富な水量と急流を活用して、古くから水力エネルギーの宝庫として注目されてきた。関西電力は黒部川流域に 10 ヶ所の発電所を有し、年間約 30 億 kWh の電力量を得る重要な電力源となっている。

黒部川においては、流域内ダム・発電所の運用の特性から、前節に示した 4 項目のうち下記に示す 2 項目が主要かつ喫緊の課題として挙げられる。

これらのニーズおよび電力源としての重要性が、黒部川を対象として、高精度のダム流入量予測システムを開発するべく研究を開始した理由である。

（１）出水時の体制確保（排砂）

黒部川流域の地質は全域にわたり新旧の花崗岩類で構成されており、これらの花崗岩は一般に岩が脆いため、非常に崩壊しやすい。このため、前述の稀に見る多雨多雪地帯であることと重なり、極めて土砂生産量が多い河川となっている。

このため、関西電力が保有する 4 ダムのうち最後に建設された出し平ダム（1985 年竣工）では、ダムの堤体内に大規模な排砂路を 2 条設け、ダム水位を下げることにより

図-1.3.9　研究対象流域（黒部川流域）

貯水池内をフリーフローとして貯水池内の堆積土砂を排出できる構造としている。このダムから土砂を排出することを排砂と呼んでいる。

①排砂の経緯

ダム竣工から 6 年が経過した 1991 年 12 月、この排砂設備を用いて初めて排砂を実施した。しかし、この期間中にダム湖内に堆積し変質した有機物がダム下流に流れ出し、下流河川だけでなく黒部川河口沿岸の漁業関係者に大きな迷惑をかける結果となった。この環境に与えた影響の重大性に鑑み、1992 年に富山県主導で「黒部川出し平ダム排砂影響検討委員会」が設置され、排砂の必要性、環境影響の少ない排出方法等について、学識経験者

をはじめ、県、流域市町村、県漁連、内水面漁協、土改連等の地元関係者団体が参加し、調査、検討、議論を重ねた。また、この委員会の検討の一環として、1994 年 2 月に試験排砂を行い、その環境影響が入念に調査、検討された。これらの結果、排砂は必要であり、出洪水時に合わせて排砂を実施することにより環境に与える影響を抑えることができるとの委員会提言が出された。その後、後述する 1995 年 7 月の大出水による災害復旧のための緊急排砂を 3 ヶ年にわたって実施し（全 3 回）、さらに 1998 年からは、それまでの委員会提言を受けて、出洪水時に合わせて恒常的排砂を実施してきた。緊急排砂、恒常的排砂の実施にあたっても、学識経験者、関係自治体、旧建設省等からなる委員会、協議会等を設置し、排砂計画、排砂結果、環境影響調査内容などについて審議を受け、環境影響の少ない排砂方法の確立に努めてきている。また、2000 年には下流の宇奈月ダムが試験湛水を開始し、それ以降は、出し平ダムと宇奈月ダムが同時に協業して排砂する「連携排砂」を実施している。

②排砂実施時の体制

現在の排砂実施基準は、6~8 月の出水期間中に、ダム流入量が、出し平ダムで 300 m^3/sec、宇奈月ダムで 400 m^3/sec のいずれかを上回る最初の出水のときとなっている。ただし、融雪や梅雨などにより流量の大きい時期（具体的には 6 月 1 日から梅雨明けまで）に限り、出し平ダムへの流入量が 250 m^3/sec に達した場合でも実施する。また、排砂を実施後、上記期間中に再び土砂の流入量が多い大規模な出水が生じた場合、その洪水により流下してくる土砂をそのまま下流へ流す操作を実施しており、これを通砂と呼んでいる。通砂実施基準は、6~8 月の出水期間中に、排砂後のダム流入量が、出し平ダムで 480 m^3/sec、宇奈月ダムで 650 m^3/sec のいずれかを上回る出水の都度となっている。ひとたび排砂（もしくは通砂）の実施が決定すると、通常のダム操作員に加えて、排砂ゲートの操作や対外的な対応のために、出し平ダムおよび排砂実施本部（宇奈月ダム）に要員を配置しなければならない。この追加要員数は総勢で 48 名にのぼり、そのうちの 24 名は 3 班に分かれて 3 交代勤務となる。また、追加要員の大部分は現場まで 1 時間強かかる富山市内から派遣される。さらに、排砂によって流域の自然環境、漁業や農業へ影響を及ぼすことがないように、図-1.3.10 に示すような環境モニタリングを実施している。排砂の実施決定後は、外部の環境調査会社にそれを連絡し、所定の地点へ調査員を配置してもらわなければならない。

上記の体制が整備できるまでは排砂を実施することができない。このため、4～5 時間前に、排砂実施可能性の有無を決定する必要がある。この点から、黒部川流域では、4～5 時間先までのダム流入量を高精度で予測したいという強いニーズがある。

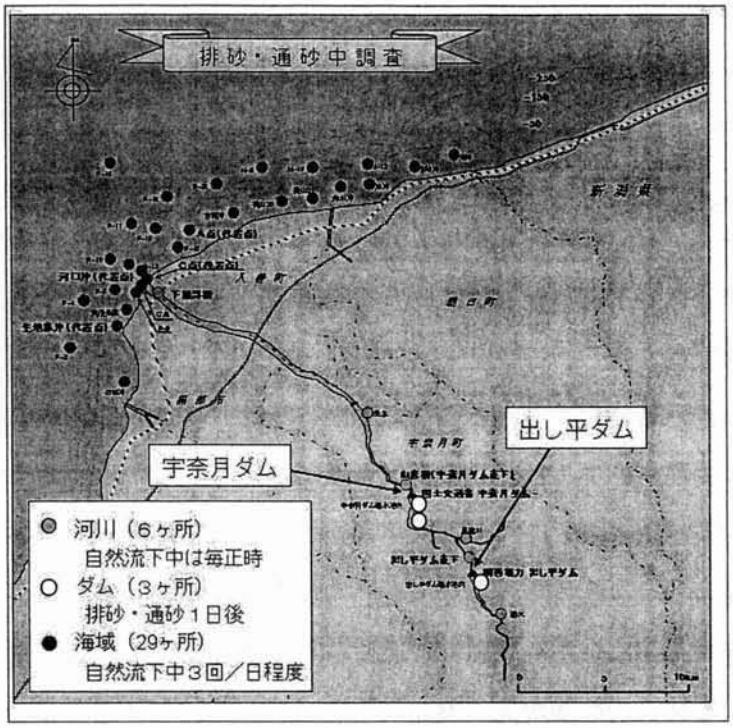


図-1.3.10　排砂時のモニタリング体制

（2）災害への対応

黒部川は、幾度となく大水害を引き起こしている。このうち、1995 年（平成 7 年）7 月 11 日から北陸地方を襲った集中豪雨は、黒部川に位置する発電設備に対して、未曾有の大被害を引き起こした（通称「7．7（なな・なな）水害」）。この集中豪雨により、上流域で大規模な斜面崩壊による大量の土砂が黒部川に流出し、下流とダム群を結ぶ黒部峡谷鉄道や通信線が寸断された。この結果、ダム操作員や工事関係者がダム管理所や合宿所などで一時孤立し、合計 69 名がヘリコプターで救出される事態が発生した。幸いにも人的被害は全くなかったものの、今後、人命にかかわる災害を防止するためには、交通手段や通信・電気設備などの充実を図るだけでなく、降雨予測を含むダム流入量予測システムを構築し、作業中止や避難を的確に判断できる体制の必要性が強く認識された。

特に、降雨予測については、全国大でみれば気象庁による予測精度が近年徐々に向上してはいるものの、急峻な山岳地形の影響で局地的な豪雨が頻発している黒部川流域においては、気象庁から配信される気象データだけでは十分ではないと認識し、新たな予測モデルを構築することとした。

１．４　結語

本章では、電力ダムに焦点をあて、その運用の実態を整理した後、ダムを適切に運用、管理していくためには、精度の高いダム流入量予測が必要であることを論じた。本章を要約すると、次のとおりである。

第２節においては、本研究に関連する導入として、電力ダムの運用の実態と課題について説明した。まず、電力ダムの役割や歴史を述べた後に、ダムを設置することによって生じる恐れのある悪影響を示し、これを未然に防ぐために、利水ダム管理者にとっては、積極的な治水量の役割は義務付けられていないものの、河川の従前の機能を維持し、危害防止の措置等を行う責務があること、この責務を果たすために、各ダムにはダム操作規程が定められることを述べた。つぎに、ダム操作規程の具体的内容および、それに基づいた具体的なダム操作の方法を概説した。さらに、ダムに係わる社会的紛争として、ダム管理者あるいは河川管理者を被告とする訴訟の事例を紹介した。これらを踏まえ、電力ダムの管理者に課せられた運用上の課題をまとめた。

第３節においては、本研究を進める上での具体的な動機付けについて紹介した。まず、本研究の主目的である降雨予測と流出予測の現状とこれまでのリアルタイムダム流入量予測システムの事例について整理した。続いて、第２節の最後でまとめた電力ダムの管理者に課せられた運用上の課題として

（１）ダム操作信頼性の向上

（２）災害への対応

（３）出水時の体制確保

（４）最適発電運用

を挙げ、それらの課題解決のため、精度の高いダム流入量予測の重要性と必要なリードタイムを論じた。最後に、本研究を進めるにあたり、具体的な研究フィールドとして、黒部川を選定したことを述べた。これは、著者の所属する関西電力において、重要な水力電源地帯であるためであり、黒部川で特に求められるダム流入量予測のニーズについてとりまとめ、次章以降で説明するダム流入量予測システムの必要事項を明らかにした。

第１章　参考文献

1) 経済産業省資源エネルギー庁　電力・ガス事業部編：平成 17 年度　電力需給の概要，pp.4，2006.

2) ダム技術センター：多目的ダムの建設　第１巻　計画・行政編，pp.74-77，2005.

3) 河川法研究会：河川法解説，大成出版社，pp.6-17，1994.

4) 日本大ダム会議：ダムの役割，大ダム，No.194，pp.25-32，2006.

5) 河川法研究会：河川法解説，大成出版社，pp.253-254，1994.

6) ダム水源地環境整備センター編：ダムの管理　例規集　平成 15 年版，山海堂 pp.471-480,501-521，2003.

7) 全国建設研修センター：ダム操作の基本（平成 6 年度ダム管理主任技術者研修テキスト），pp.2-5，1994.

8) ダム水源地環境整備センター：ダム管理の実務，pp.337-352，1999.

9) 日本ダム協会：ダム年鑑　2005，2005.

10) 宝　馨：森林の流域への影響，岩波講座　地球環境学 7　水循環と流域環境，高橋裕，河田恵昭　編，岩波書店，pp.43，1998.

11) 櫃間道夫：完全図解　気象百科，オーム社，pp.43，2004.

12) 土木学会水理委員会：水理公式集［平成 11 年版］，土木学会，pp.48-49，1999.

13) 気象庁ホームページ：http://www.jma.go.jp/jma/index.html

14) 気象業務支援センター：http://www.jmbsc.or.jp/hp/online/f-online3i.html

15) 気象庁予報部：新しい数値解析予報システム，数値予報課報告・別冊第 47 号，pp.1-52，気象業務支援センター，2000.

16) 池淵周一，椎葉充晴，宝　馨，立川康人：エース水文学，朝倉書店，pp.188-197，2006.

17) 土木学会水理委員会：水理公式集［平成 11 年版］，土木学会，pp.35-44，1999.

18) 立川康人，永谷　言，寶　馨：分布型流出モデルにおける空間分布入力情報の有効性の評価，京都大学防災研究所年報，第 46 号，B-2，pp.1-16，2003

19) 国土交通省国土計画局ホームページ：http://www.mlit.go.jp/kokudokeikaku/gis/index.html

20) 垣見健三，柏倉勇，笠原克浩：GPV データを活用した降雨予測，電力土木，pp.40-46，No.269，1997.

21) 向原秀樹，豊田康嗣，杉本聡一郎：気象レーダーを用いた出水予測手法に関する研究，

電力土木，pp.180-184，No.300，2002.

22) 本田章人，三浦雅彦，村上晃生：10 分間更新短時間降雨予測手法を用いた河川流出予測の現地適用性，電力土木，pp.82-86，No.313，2004.

23) N. Hashimoto，K. Kataoka：Development of a system for operating the spillway gate for hydroelectic dams, Proc. of ICOLD - 69th Annual Meeting Dresden，Vol.1，pp.293-313，2001.

24) 橋本徳昭，片岡幸毅：電力ダムの洪水吐ゲート操作に関するシステム開発，大ダム，No.177，pp.65-75，2001.

25) 富山県自然保護協会：黒部川流域の自然と土砂流出－黒部川の濁水現象に関する報告－，関西電力北陸支社，pp.11-41，1987.

第２章　急峻な山岳域における気象・降雨特性の解明に関する研究

２．１　概説

わが国の急峻な山岳域の代表とも言える黒部峡谷の気象・降雨特性を解明するには、まず降雨時の黒部川水系を含む広領域の気象・降雨特性を把握し、その広領域の実況との関係を踏まえながら峡谷内の実況を把握することが必要となる。

第１章でも述べた 1995 年（平成 7 年）7 月の黒部川水害の事例にも該当するように、黒部峡谷では周辺の地域と比較して降水量が多い（図-2.1.1 参照）。この事実は、平野部から黒部峡谷に接近してきた水蒸気を多く含んだ大気が急峻な山岳地形によって強制上昇し冷却されることによって、水蒸気から雨滴へ変化することが大きな要因であると考えられる。しかし、黒部峡谷内の急峻で複雑な地形を考えると、単純な山地による降雨増幅効果以外に何らかの降雨発生・増幅機構が存在している可能性が高い。著者の所属する関西電力はこのような降雨特性をまさに電力エネルギーに生かすべく黒部峡谷で長年発電事業を営んでいるが、著者の知る限り、黒部峡谷特有の気象・降雨特性をそのメカニズムレベルまで踏み込んで調査したという事例はない。

本章では、黒部峡谷の気象・降雨特性を解明すべく、まず黒部峡谷および周辺地域の地上雨量データを 12 ヵ年の比較的長期間にわたり綿密に解析することで、その降雨特性を、降雨成因、季節、降雨規模、高層風の風向、大気安定度、などの観点から詳細に分析する。つぎに 4 ヵ年にわたって現地観測を実施した結果について述べる。現地観測の目的は、図-2.1.2 に示すとおり、黒部峡谷周辺の気象・降雨特性把握および黒部峡谷内の気象・降雨特性把握の大きく 2 種に分かれる。黒部峡谷周辺の気象・降雨特性の把握は、富山平野にドップラーレーダーを設置・観測することで実施する。この観測によって黒部峡谷および西方を中心とした周辺の降雨セルの水平断面構造、鉛直断面構造等を明らかにする。また黒部峡谷内の気象・雨特性把握については、X-band ミニレーダーを黒部ダムサイトおよび立山山頂付近に設置することで、それぞれ降雨セルの鉛直断面構造および水平断面構造を把握する。さらに黒部ダムサイトから GPS ゾンデ観測を行い、風向・風速、気温、湿度といった気象要素の鉛直断面構造を把握する。

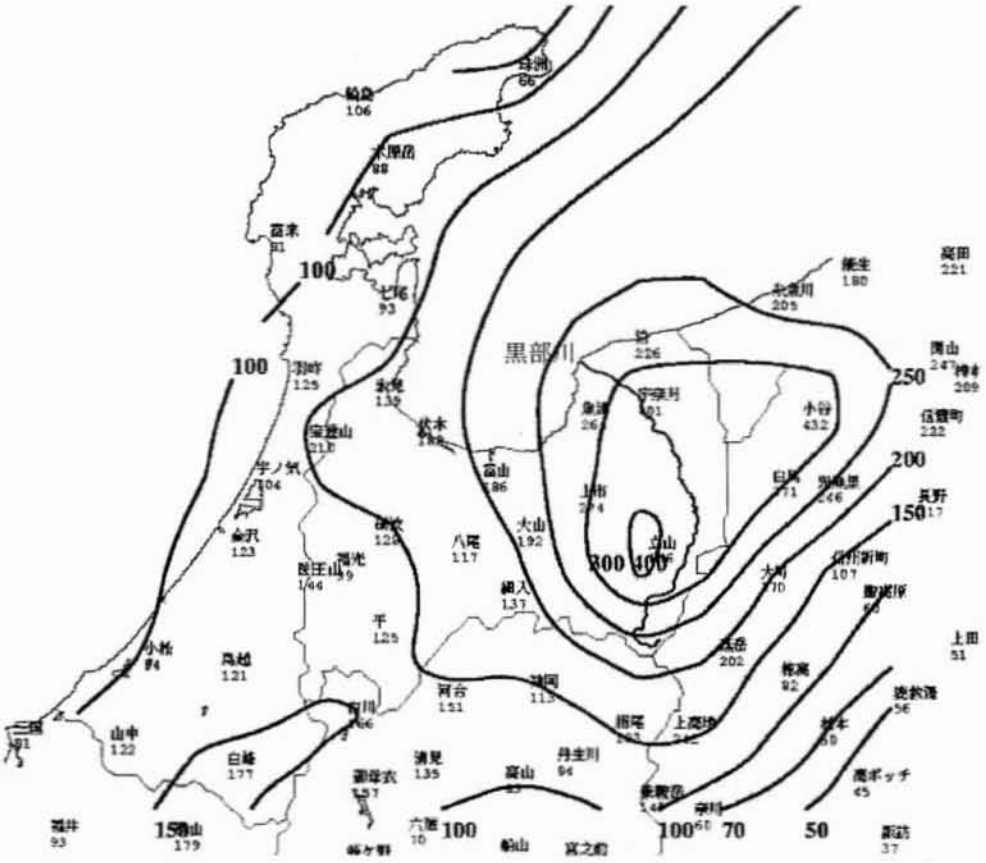


図-2.1.1　　一雨雨量の分布図（1995 年 7 月 10 日～14 日）

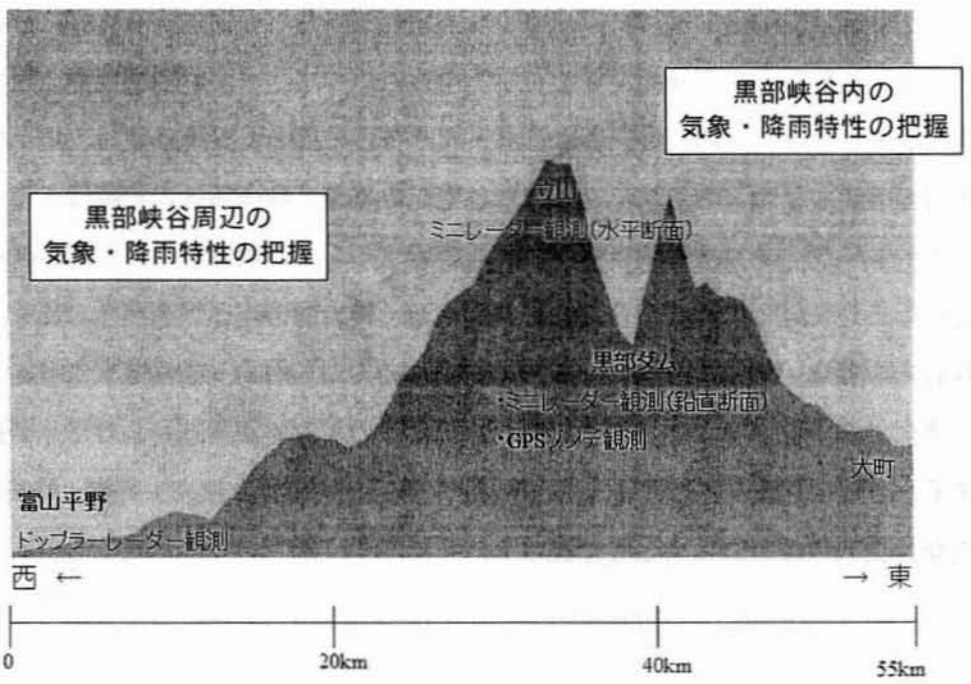


図-2.1.2　　本研究で実施した気象・降雨観測の概念図

２．２　黒部峡谷および周辺地域の地上雨量データ解析

本節では、黒部峡谷の気象・降雨特性を解明すべく、まず黒部峡谷および周辺地域の地上雨量データを綿密に解析することで、黒部峡谷の気象・降雨特性を、全般的な特性、降雨成因別、季節別、降雨規模別、高層風の風向別、大気安定度別の特性、豪雨事例の特性の観点から詳細に把握する。

２．２．１　解析対象雨量データ

（１）　対象観測地点

解析の対象地域は、黒部峡谷内および黒部峡谷の気象・降雨現象に影響を及ぼすという観点から黒部峡谷の西方を中心とした周辺地域とした。対象とした雨量観測地点は、40 箇所の気象庁アメダス観測地点および 7 箇所の関西電力観測地点の全 47 地点である。

図-2.2.1 に解析対象とした雨量観測地点を示す。解析対象地点の一覧表は付録 1 に示す。

（２）　対象降雨

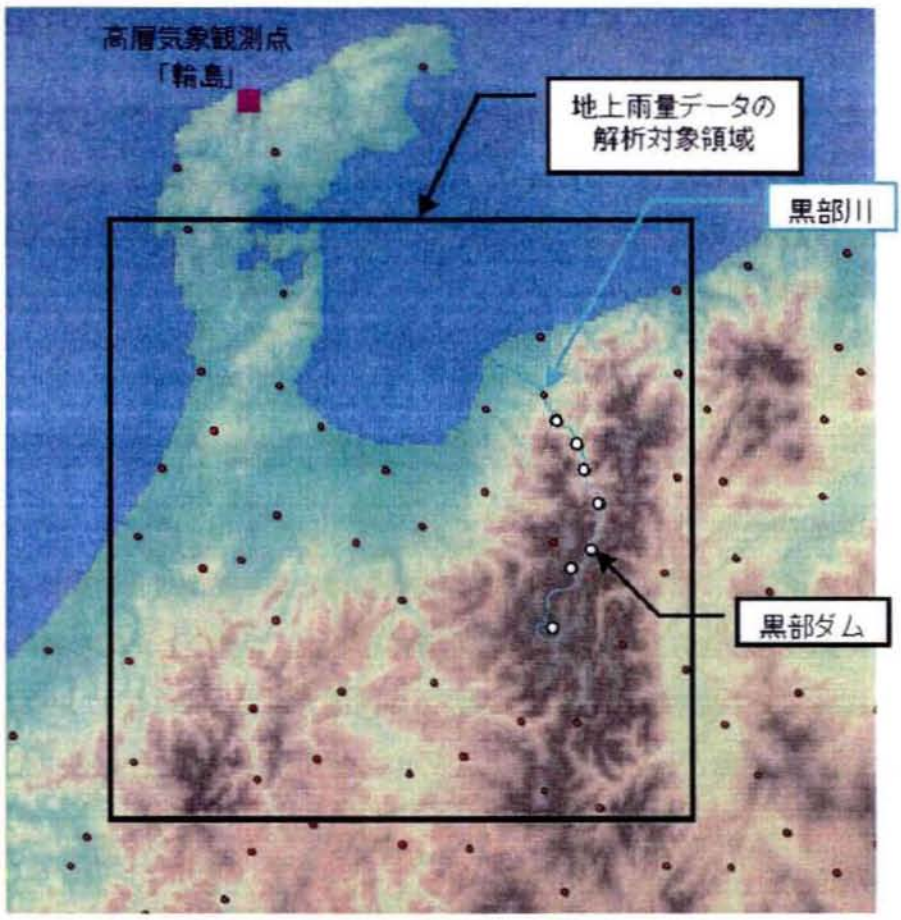
解析の対象とした降雨は、1988 年～1999 年の 12 年間で、気象庁アメダス観測地点の「立山」、「宇奈月」、「白馬」のいずれかの地点において、一雨（12 時間無降雨で定義）50mm 以上かつ時間雨量 10mm 以上を観測した全 204 降雨事例とした。解析対象降雨事例の一覧は付録 2 に示す。

２．２．２　地上雨量データからみた黒部峡谷の降雨特性

（１）全般的な特性

抽出した全 204 降雨事例を対象に、雨量観測地点ごとに、降雨期間内の最大 4 時間雨量、最大 24 時間雨量、降水時間数（1mm 以上の降水が観測された時間数）の平均を求めた。ここで、最大 4 時間雨量および最大 24 時間雨量をとりあげた理由は、黒部川におけるハイドログラフからみて前者は出水時ピーク流量に、後者は出水時全流出量に対して支配的な要因と考えられるためである。

図-2.2.2 に最大 4 時間雨量、最大 24 時間雨量、降水時間数の各観測地点の平均値を示す。



●：アメダス観測点　○：関西電力観測点　■：気象庁高層観測点

図-2.2.1　解析対象雨量観測地点

広域を示す図-2.2.2 の左図より、最大 4 時間雨量、最大 24 時間雨量ともに、平野部に比べ山岳域である黒部峡谷付近の降雨量が大きいことがわかる。特に最大 4 時間雨量においてその傾向が顕著である。また、最大 4 時間雨量、24 時間雨量ともアメダス観測点「立山」で最大を示している。

一方、黒部峡谷付近の狭域を示す図-2.2.2 の右図より、「立山」、「刈安」の立山稜線～黒部川上流域で、最大 4 時間雨量、最大 24 時間雨量とも極大となっていることがわかる。以下では、この「立山稜線～黒部川上流域で最大 4 時間降雨量、最大 24 時間降雨量が極大になる傾向」を便宜的に「黒部川上流域降水量極大傾向」と呼ぶこととする。

なお、降水時間数は「立山」、「雲ノ平」、「乗鞍岳」など高標高地点で大きな値を示しているが、分布の偏りは、広域、狭域とも顕著には見られない。

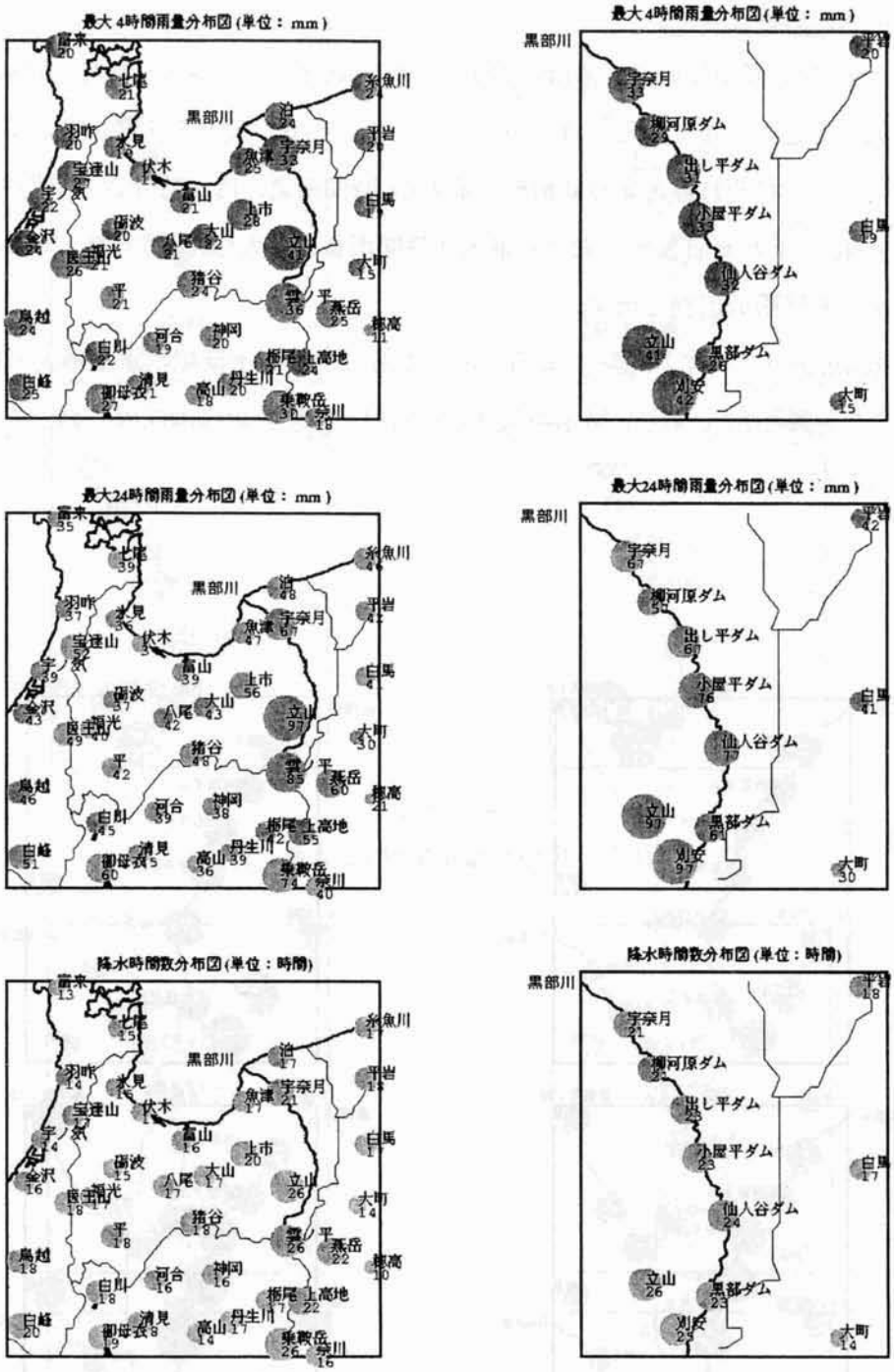
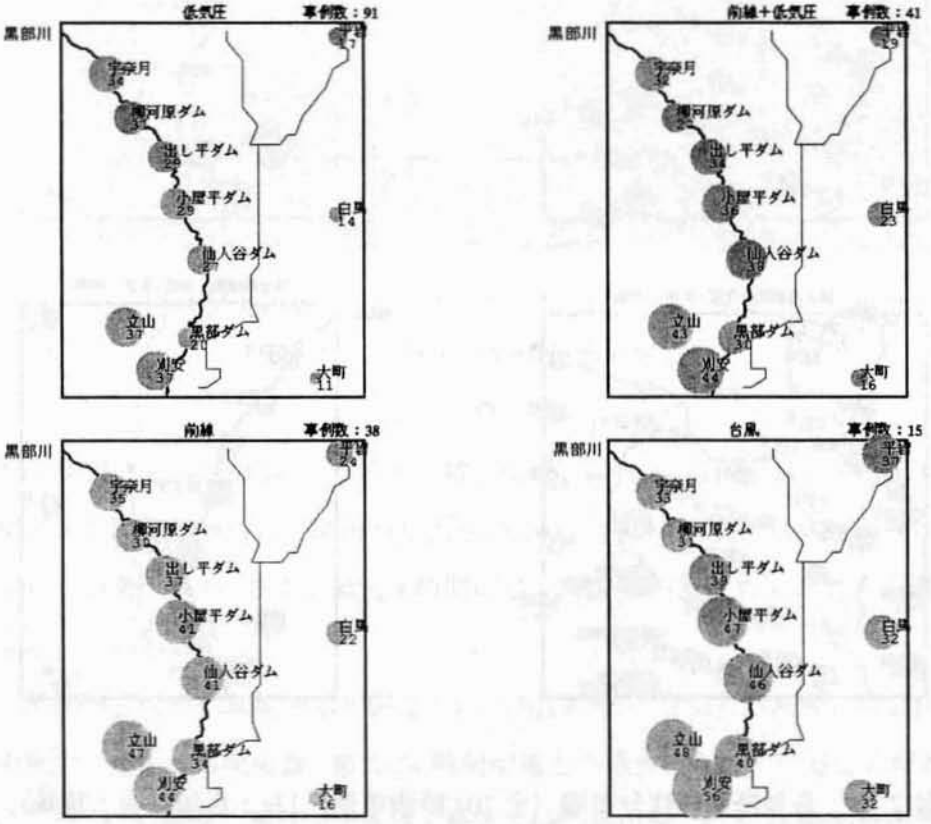


図-2.2.2　各種降雨特性分布図（全 204 降雨事例）（左：広域、右：狭域）

（２）降雨成因別特性

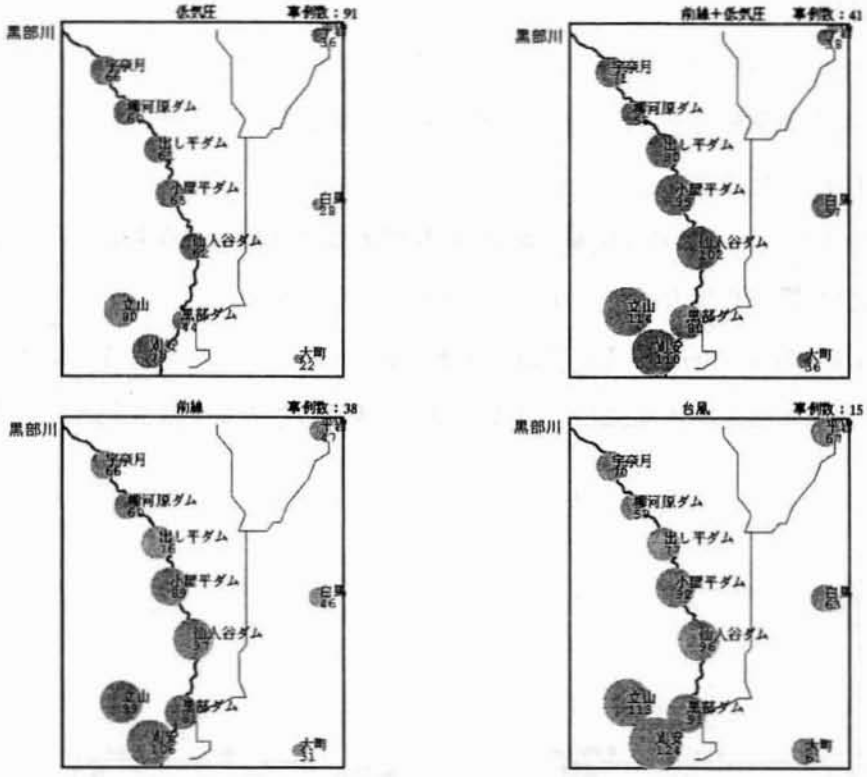
抽出した全 204 降雨事例は、降雨成因からみて、低気圧、前線＋低気圧、前線、台風、冬型、大気不安定の 6 種に分類されるが、このうち、冬型、大気不安定を除く 4 種の降雨成因について、それぞれ最大 4 時間雨量、最大 24 時間雨量、降水時間数の平均を求めた。図-2.2.3(a)～(c)にそれぞれ狭域における最大 4 時間雨量、最大 24 時間雨量、降水時間数の各地点の平均を降雨成因別に示す。

図-2.2.3(a)(b)より、いずれの降雨成因においても「黒部川上流域降水量極大傾向」が見られる。また、図-2.2.3(c)より、降水時間数の分布は、いずれの降雨成因においても顕著な偏りは見られない。



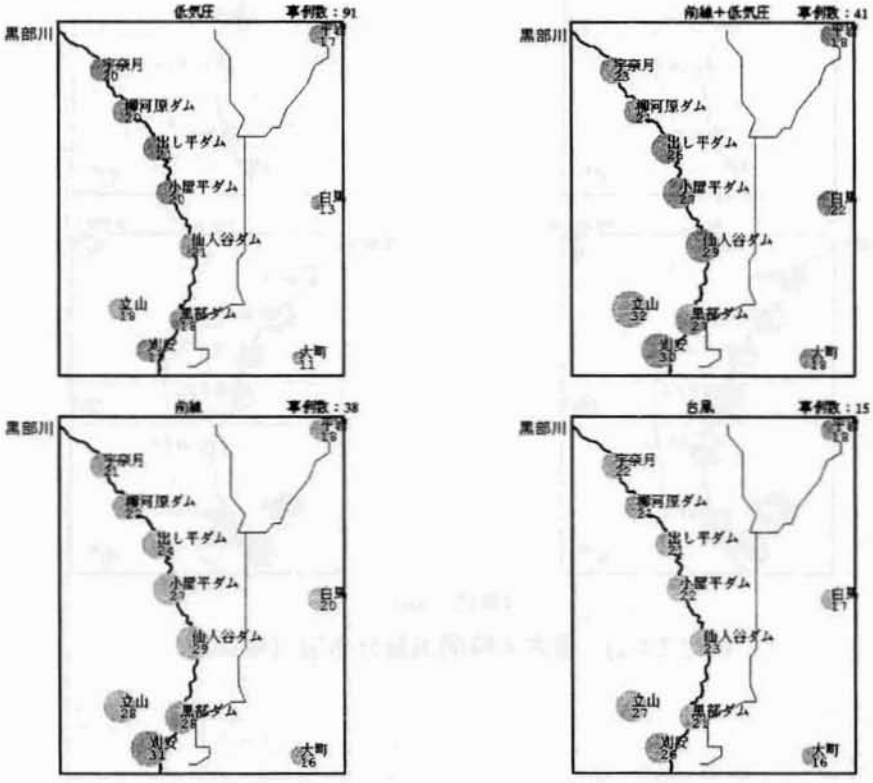
（単位：mm）

図-2.2.3(a)　最大 4 時間雨量分布図（降雨成因別）



（単位：mm）

図-2.2.3(b)　最大 24 時間雨量分布図（降雨成因別）



（単位：時間）

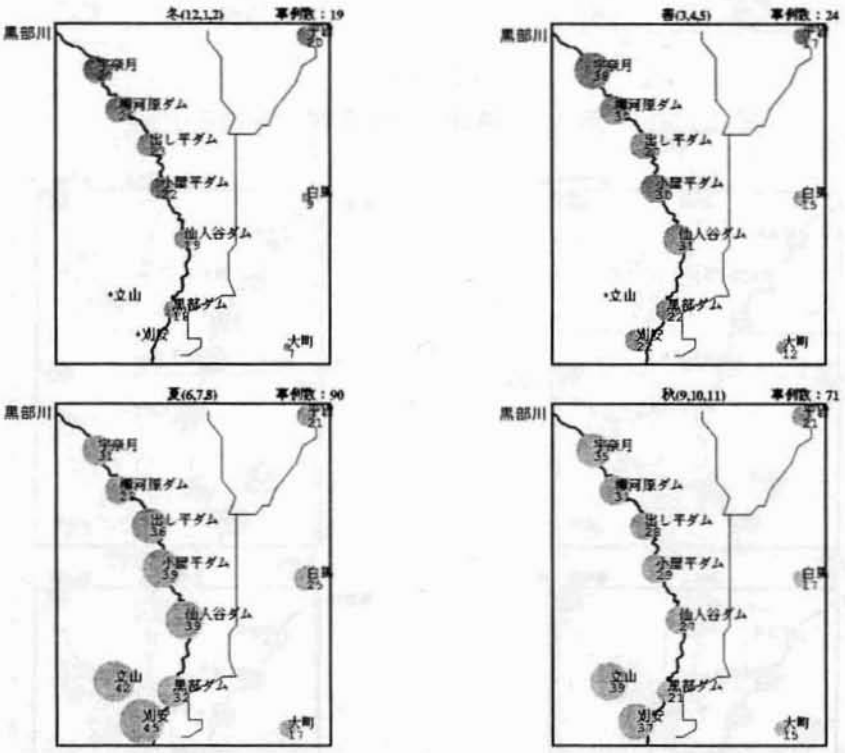
図-2.2.3(c)　降水時間数分布図（降雨成因別）

（３）季節別特性

図-2.2.4(a)～(c)にそれぞれ狭域における最大４時間雨量、最大24時間雨量、降水時間数の各地点の平均を季節別に示す。なお、春季、夏季、秋季、冬季をそれぞれ、3～5 月、6～8 月、9～11 月、12～2 月とする。

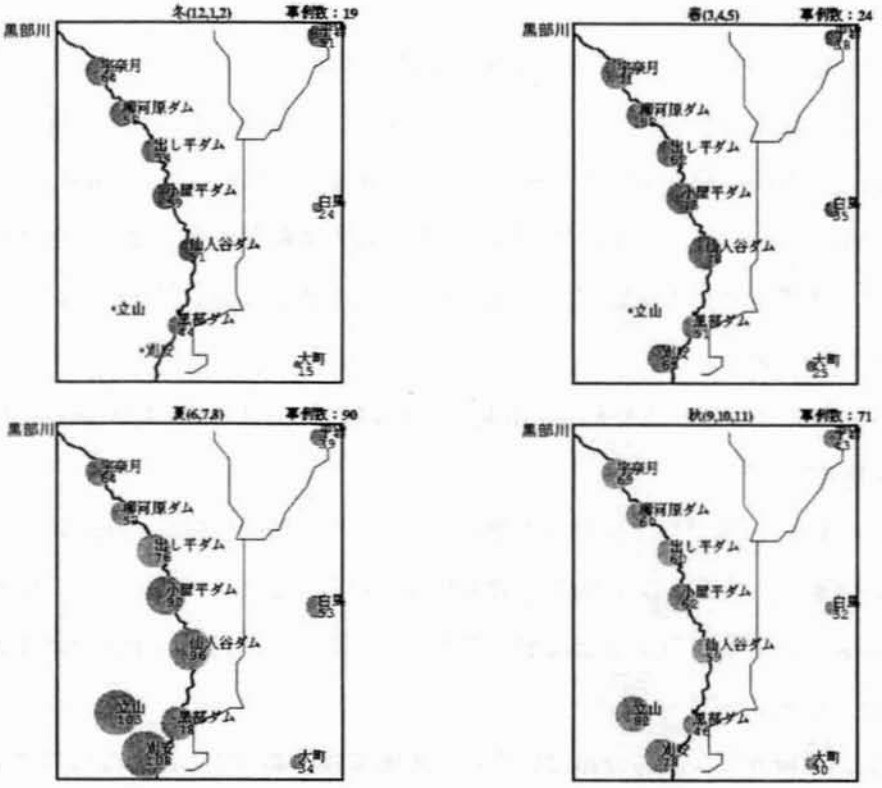
図-2.2.4(a)(b)より、最大４時間雨量、最大24時間雨量では夏季が最も降雨量が多く、また「黒部川上流域降水量極大傾向」も顕著であることがわかる。

図-2.2.4(c)より、降水時間数は冬季に最も大きい値を示しており、降雨時間に比べ降雪時間が長いことを示すものである。なお、立山、刈安は積雪のため冬季は欠測となっている。



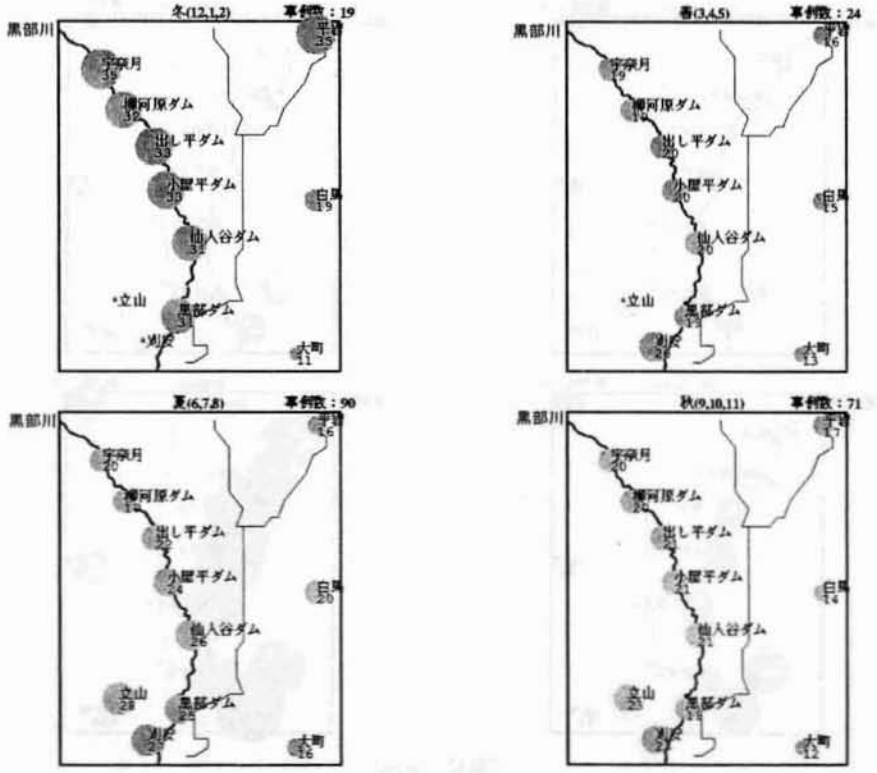
（単位：mm）

図-2.2.4(a)　最大４時間雨量分布図（季節別）



（単位：mm）

図-2.2.4(b)　最大 24 時間雨量分布図（季節別）



（単位：時間）

図-2.2.4(c)　降水時間数分布図（季節別）

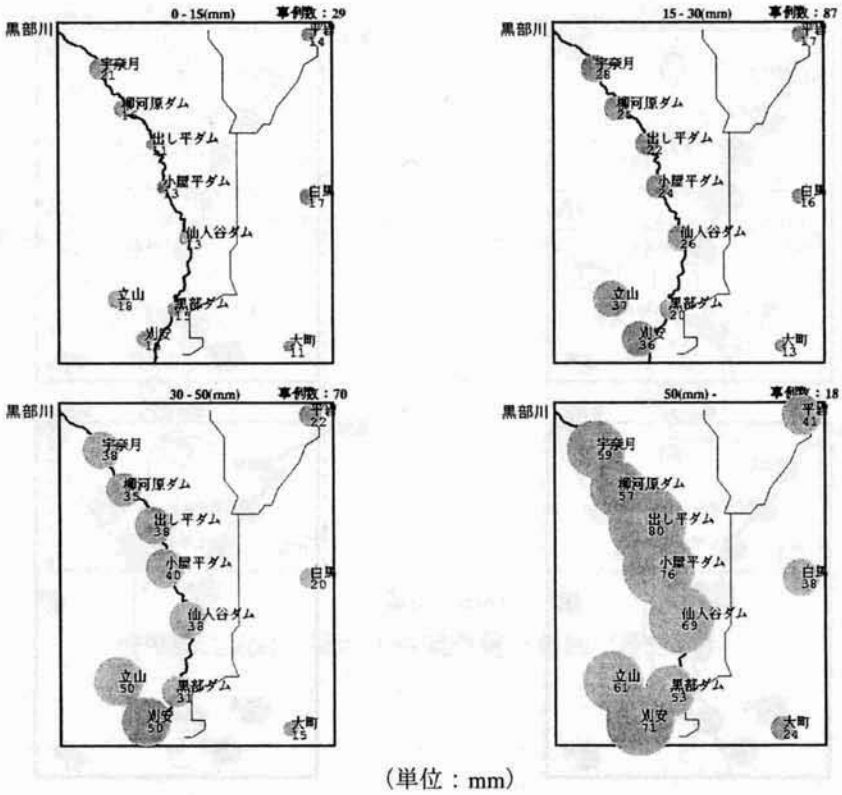
（４）降雨規模別特性

図-2.2.5(a)～(c)にそれぞれ狭域における最大４時間雨量、最大24時間雨量、降水時間数の各地点の平均を降雨規模別に示す。なお、降雨規模は、黒部川中流域に位置する出し平ダム地点の最大４時間雨量を用いて、0mm以上15mm未満、15mm以上30mm未満、30mm以上50mm未満、50mm以上の４段階に区分した。最大４時間雨量を選択した理由は、前述のとおりダム操作面で最も影響が大きい洪水時ピーク流量に対し黒部川では支配的である雨量であるためである。

図-2.2.5(a)～(c)にそれぞれ最大４時間雨量、最大24時間雨量、降水時間数の各地点の平均を降雨規模別に示す。

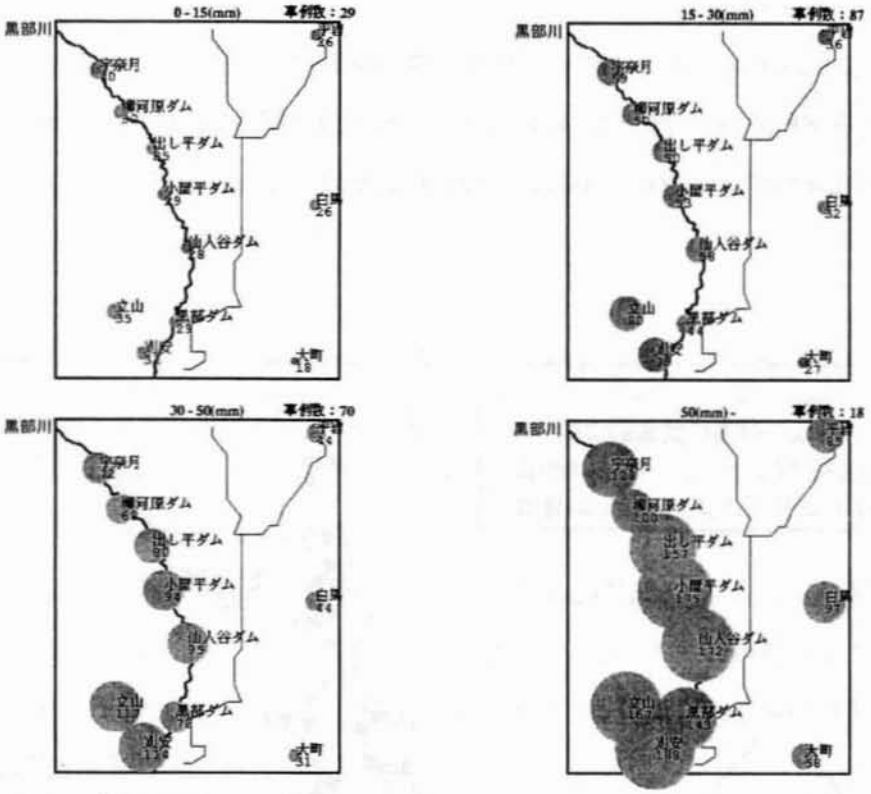
図-2.2.5(a)(b)より、「黒部川上流域降水量極大傾向」は、降雨規模が15mm以上30mm未満および30mm以上50mm未満の区分で顕著に見られることがわかる。一方、降雨規模が50mm以上の場合の最大４時間雨量は出し平ダム、小屋平ダム付近の中流域が上流域よりも大きくなっている。

図-2.2.5(c)より、降水時間数の分布はいずれの降雨規模においても顕著な偏りは見られない。



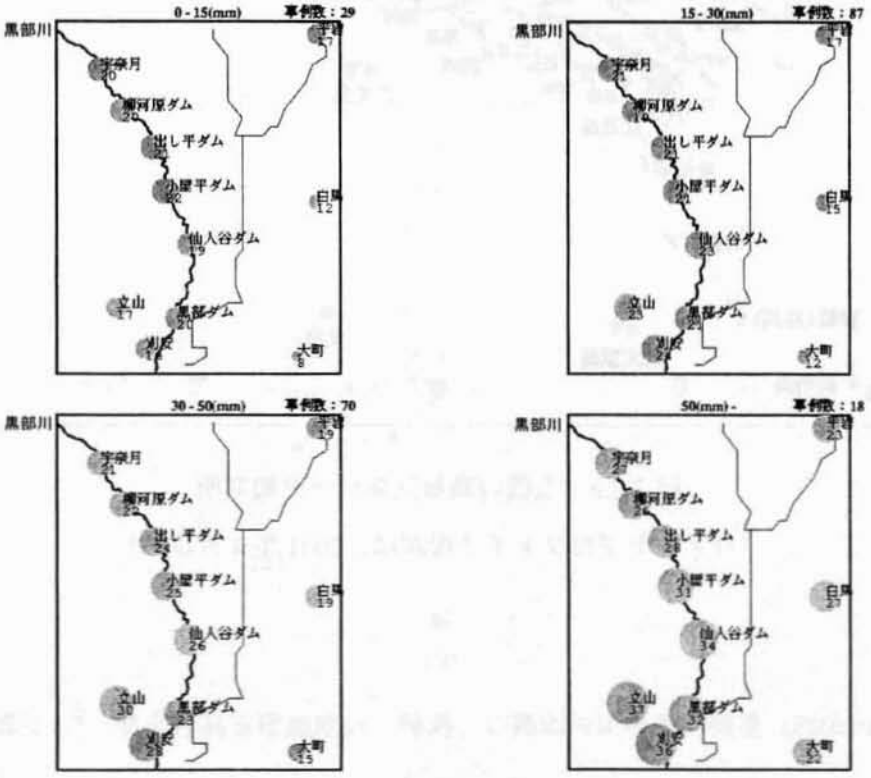
（単位：mm）

図-2.2.5(a)　最大４時間雨量分布図（降雨規模別）



（単位：mm）

図-2.2.5(b)　最大 24 時間雨量分布図（降雨規模別）



（単位：時間）

図-2.2.5(c)　降水時間数分布図（降雨規模別）

（５）高層風の風向別特性

ここでは、黒部峡谷の気象・降雨に影響が大きい可能性がある周辺の高層風から黒部峡谷の降雨特性を解析する。全国の高層気象データ観測所を図-2.2.6 に示す。解析に用いる高層風は、黒部峡谷に最も近い「輪島」での観測値を用いることとする。

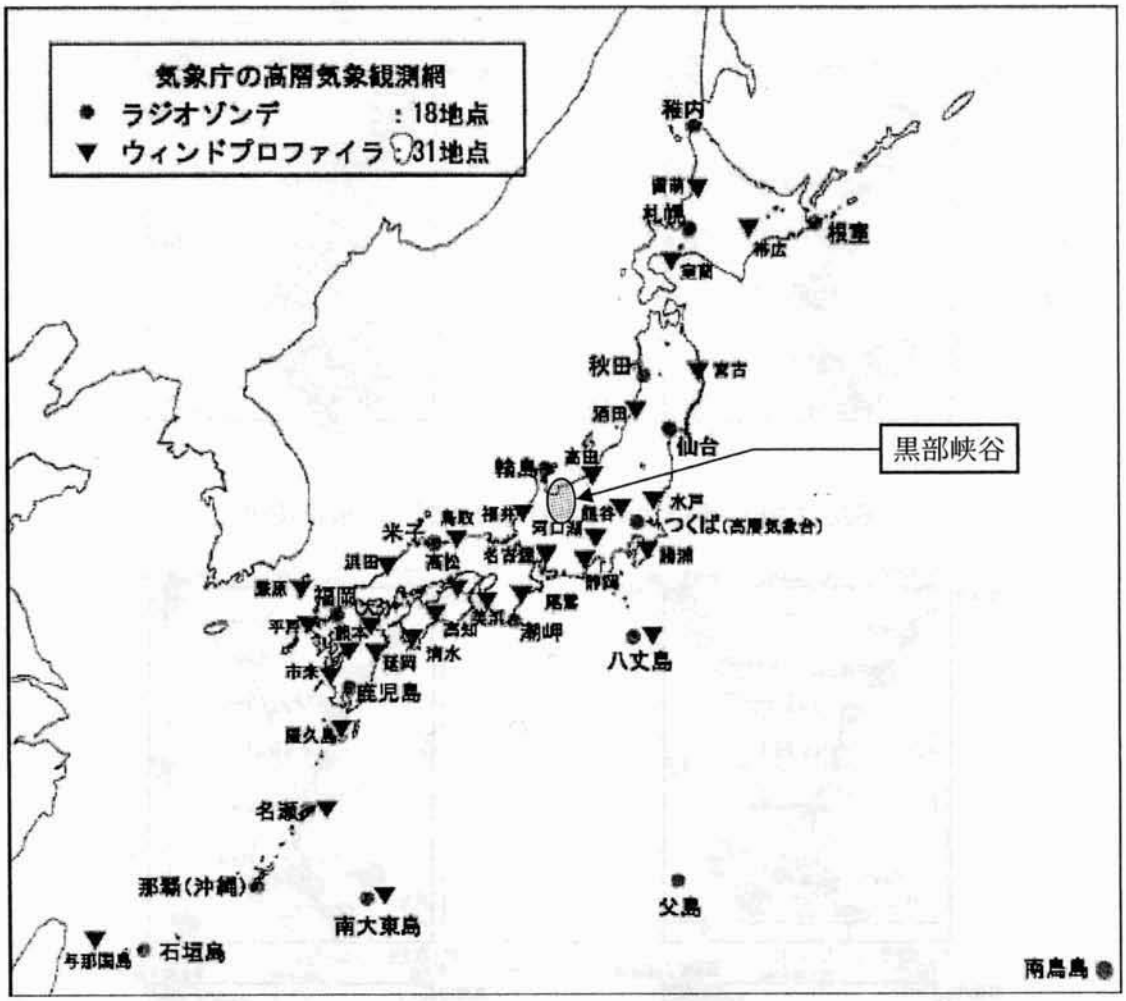


図-2.2.6　全国の高層気象データ観測所

（ウィンドプロファイラ観測は、2001 年 4 月以降）

まず、全 204 降雨事例のうち、高層気象データを入手した 1989 年以降の 189 事例を対象に、輪島における高層風の卓越風向頻度分布を分析した。用いた高層風の高度は、標高 2,000～3,000m の山岳からなる黒部峡谷における、地形性降雨に最も影響が大きいと考えられる高度 850hPa（約 1,500m）とした。卓越風向の頻度を図-2.2.7 に示す。この図より、降雨時には南西～西の風向が卓越していることがわかる。

図-2.2.8(a)～(c)にそれぞれ最大 4 時間雨量、最大 24 時間雨量、降水時間数の各地点の平均を高度 850hPa の風向別に示す。ここで、風向は、西方を中心に±45°、±180°を区切りとして、東～南西（90°～225°）、南西～西（225°～270°）、西～北西（270°～315°）、北西～東（315°～450°）の 4 範囲に区分した。

図-2.2.8(a)(b)より、風向が東～南西（90°～225°）の場合には、立山～黒部川上流域で極大ではなく、その南側の「乗鞍岳」で極大となっていることがわかる。また上記のとおり風向が南西～西（225°～270°）の事例が最も多く、この場合に「黒部川上流域降水量極大傾向」が最も顕著となっている。

図-2.2.8(c)より、降水時間数の分布は、いずれの降雨規模においても顕著な偏りは見られない。

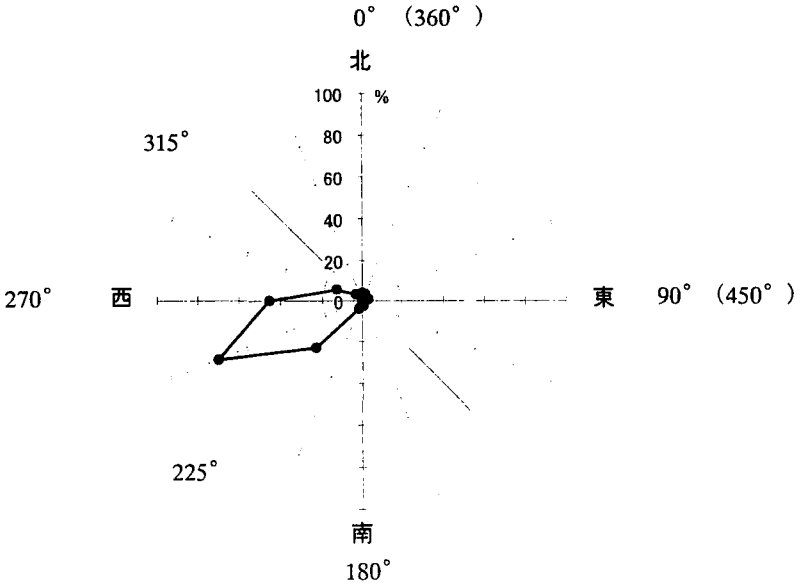
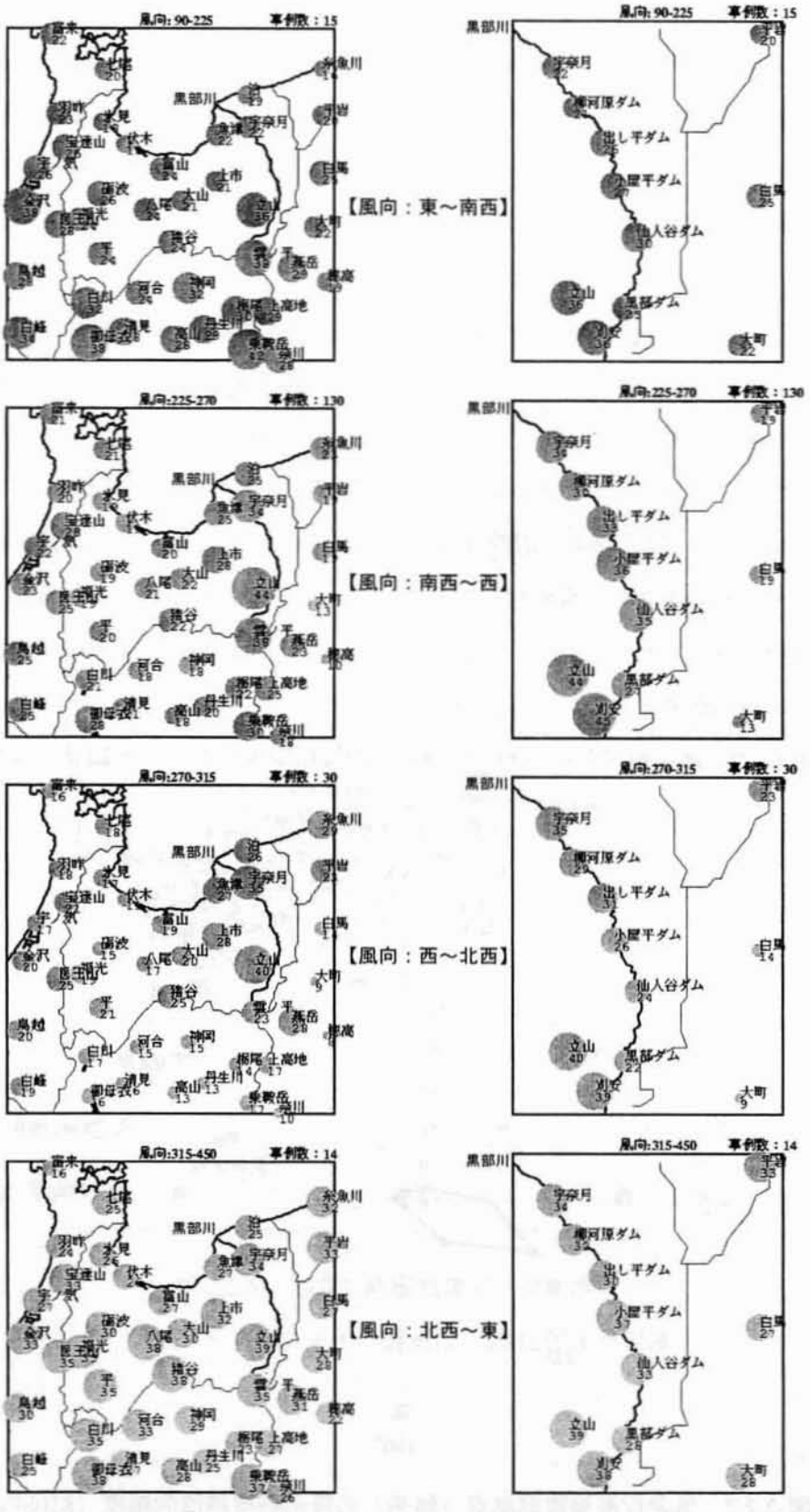
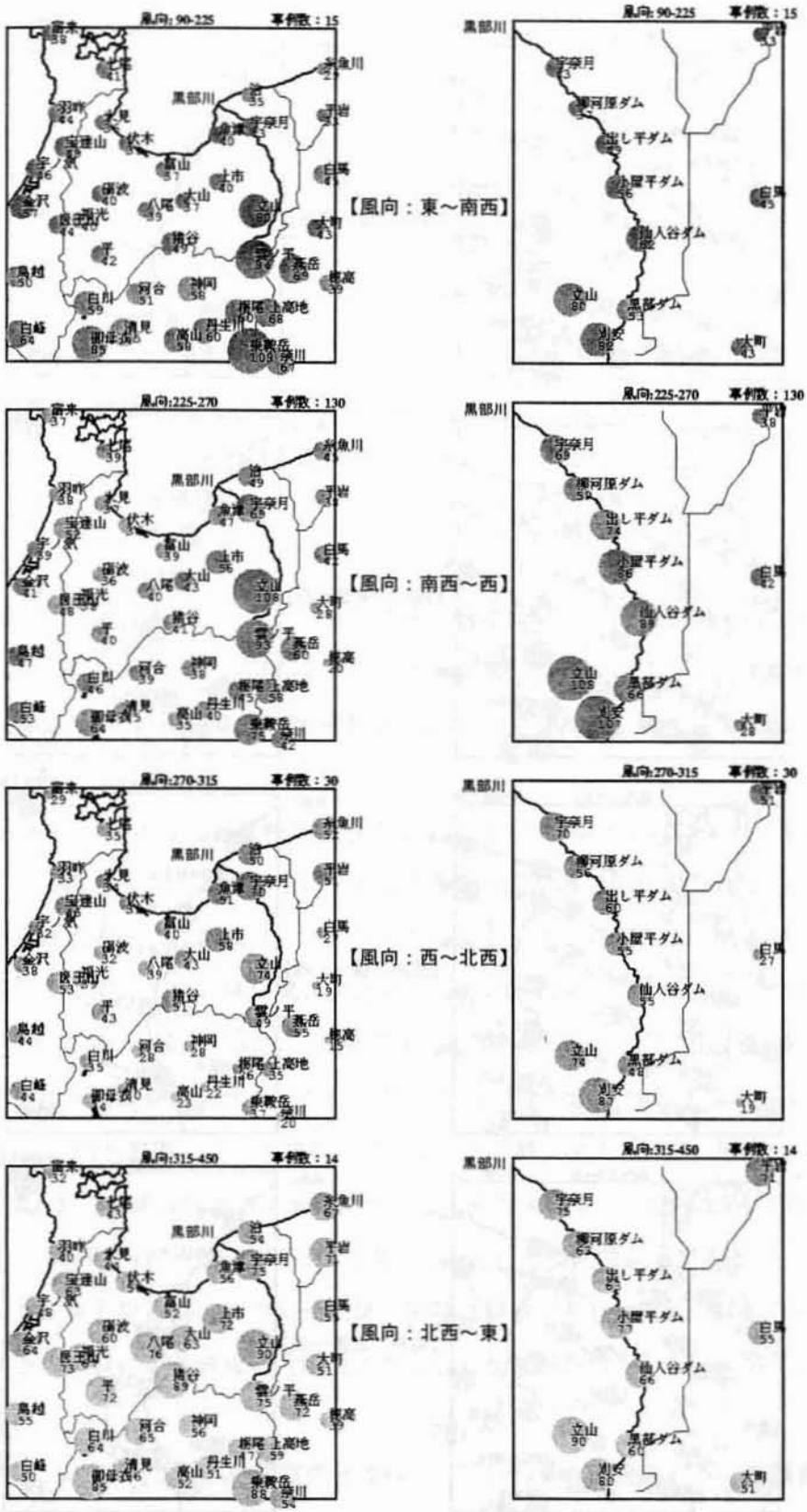


図-2.2.7　気象庁高層観測地点「輪島」の降雨時卓越風向頻度（850hPa）



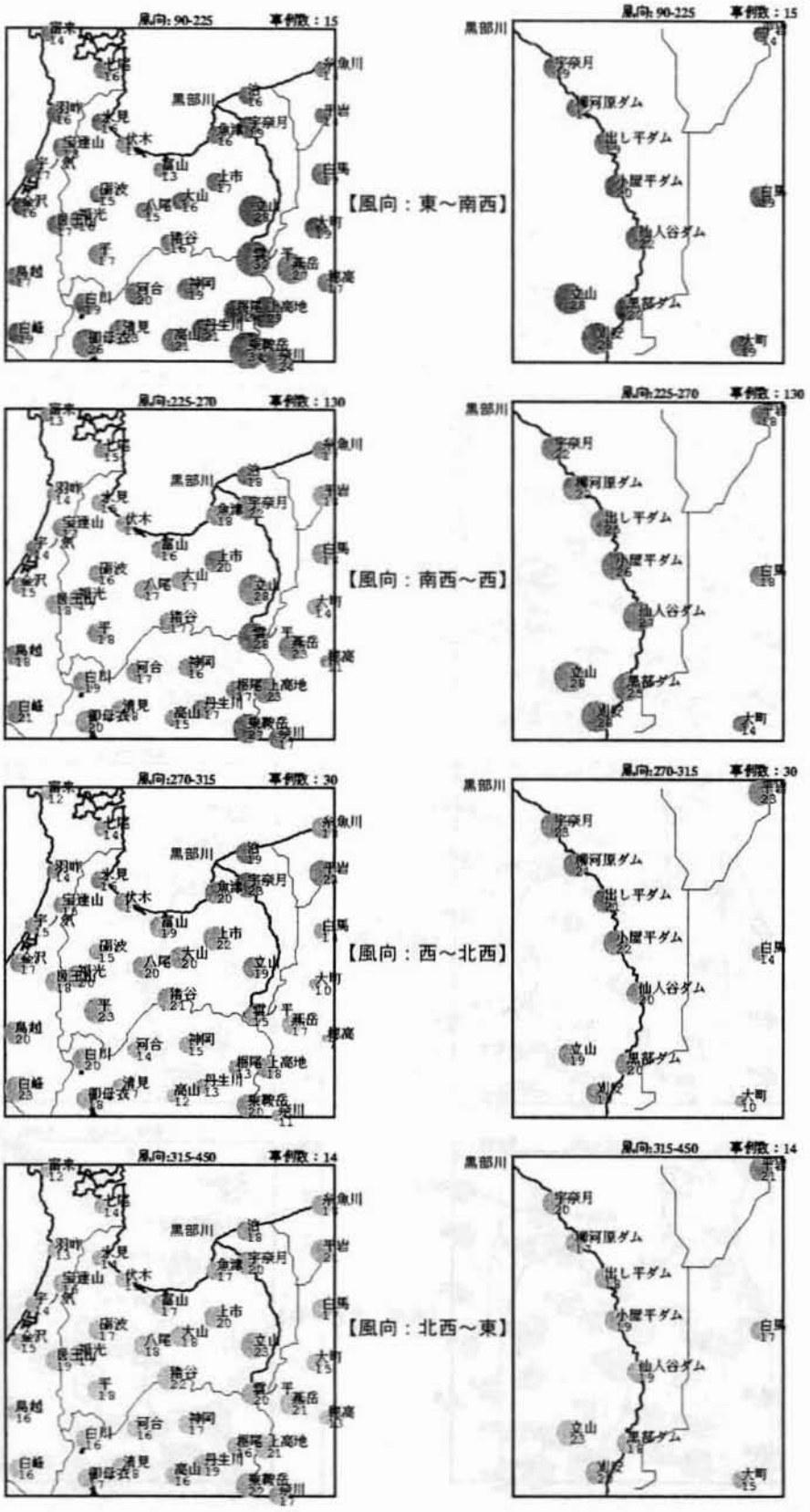
（単位：mm）

図-2.2.8(a)　最大４時間雨量分布図（高層風の風向別）（左：広域、右：狭域）



（単位：mm）

図-2.2.8(b)　最大 24 時間雨量分布図（高層風の風向別）（左：広域、右：狭域）



（単位：時間）

図-2.2.8(c)　降雨時間数分布図（高層風の風向別）（左：広域、右：狭域）

（６）大気安定度別特性

ここでは「輪島」の観測データより大気安定度を求めることとする。大気安定度の指標としては、次式に示すショワルターの安定指数[1)]（SHOWALTER　STABILITY　INDEX）を用いた。以降、ショワルターの安定指数をSSIと称する。

$$SSI = T500 - T500^* \tag{2.2.1}$$

ここに、

T500　：500hPaの気温（K）

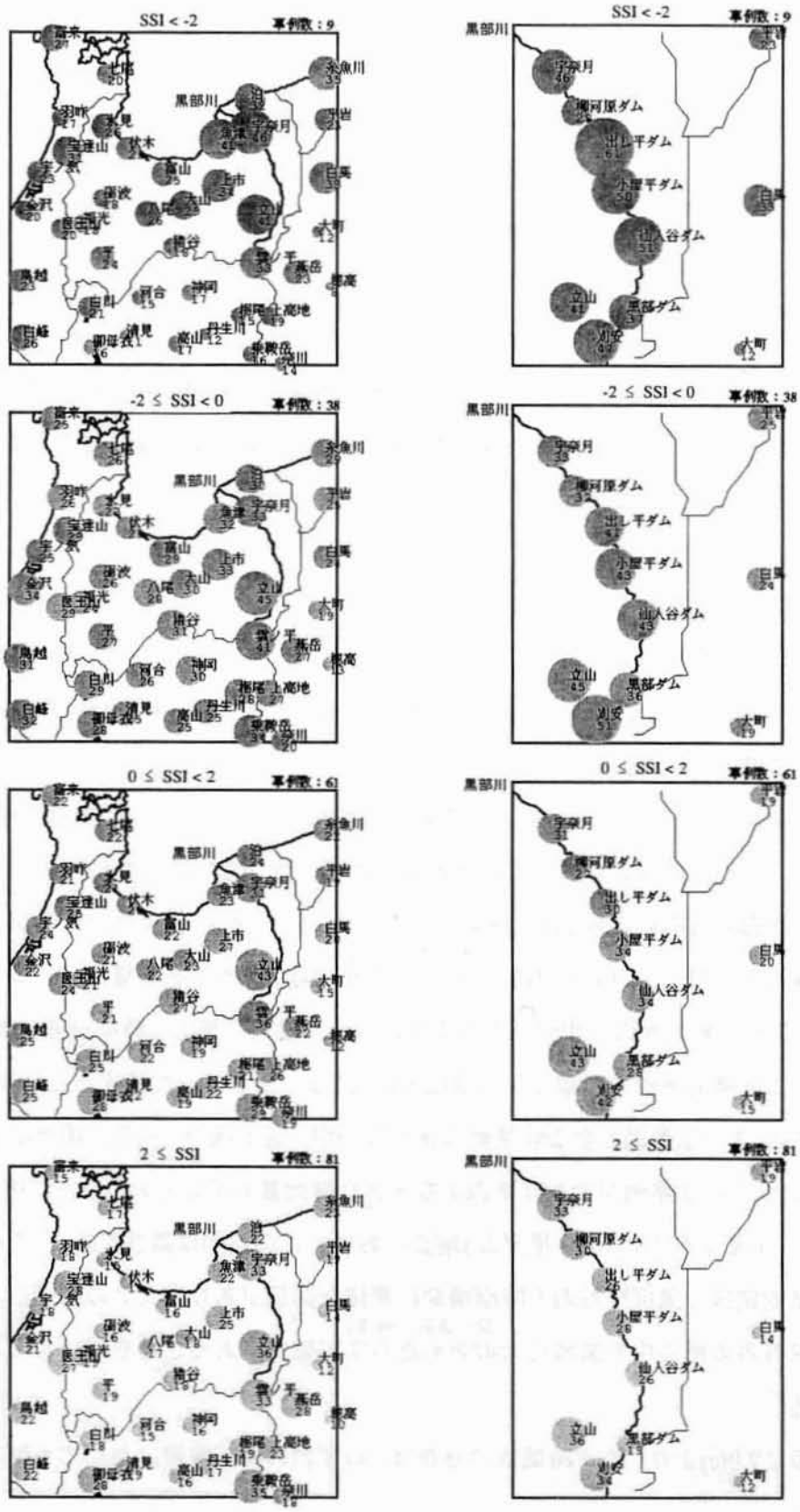
T500*　：850 hPaにおける気塊を凝結高度までは乾燥断熱上昇させ、凝結高度より上空では湿潤断熱上昇によって500hPa高度まで上昇させた場合の気温（K）

SSIは値が正であるならば大気の状態が安定、負であるならば大気の状態が不安定であることを示し、絶対値が大きいほど安定度、不安定度とも大きいことを示す指標である。

図-2.2.9(a)～(c)にそれぞれ最大4時間雨量、最大24時間雨量、降水時間数の各地点の平均をSSIの階層別に示す。

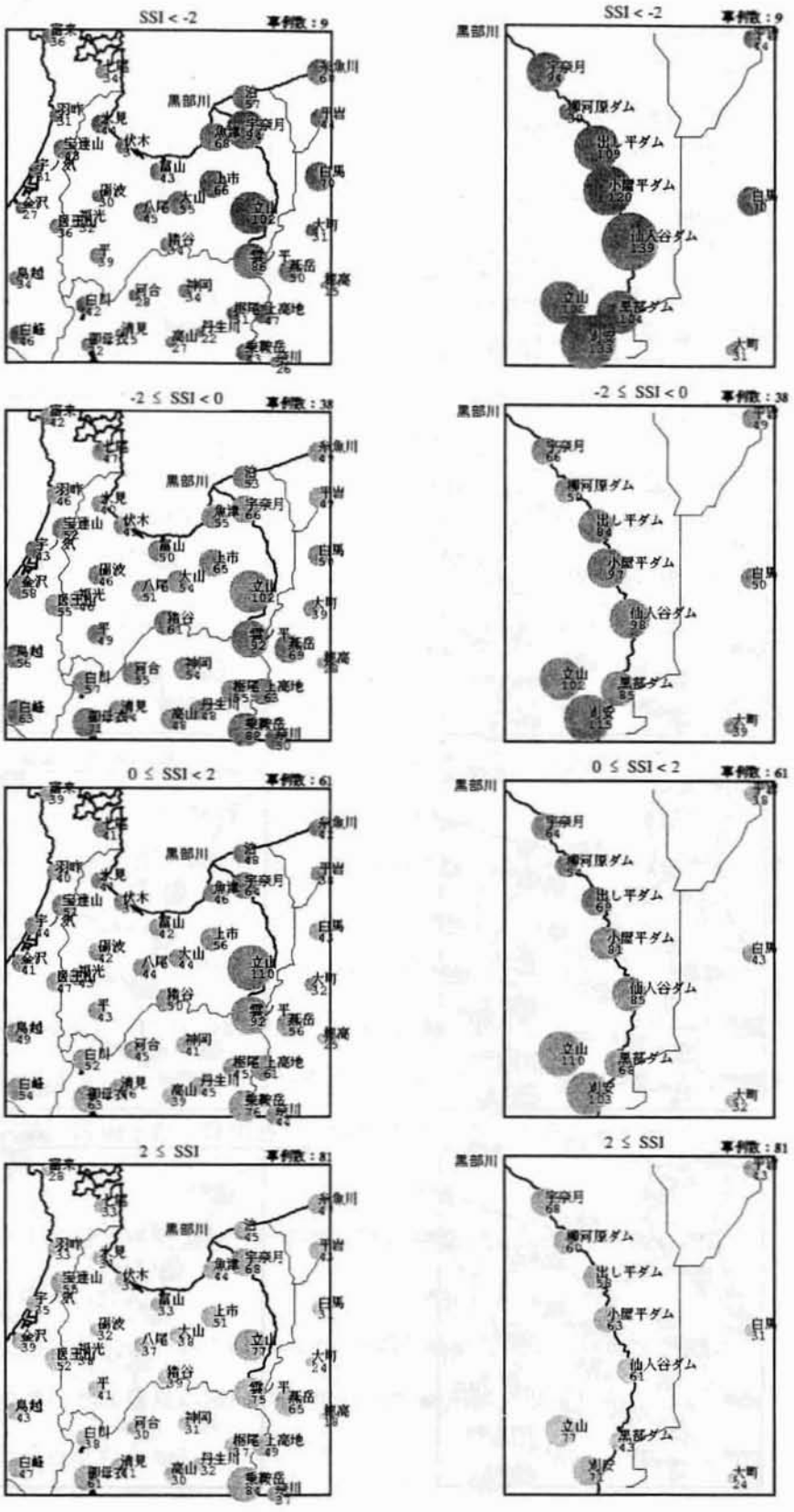
図-2.2.9(a)(b)の立山地点と黒部峡谷内各地点に着目する。最大4時間雨量、最大24時間雨量とも、立山地点はSSIの大きさにそれほど影響を受けないのに対し、出し平地点をはじめとする黒部峡谷内の各地点は、SSIが小さくなる、すなわち大気の状態が不安定になる方向に移行するにともない降雨量が大きくなる傾向があることが窺える。また、SSI<-2の階層、すなわち最も大気の状態が不安定であった9事例の最大4時間雨量、最大24時間雨量を、全204降雨事例を対象とした前出の図-2.2.2の上2図と比較すると、まず「立山」地点ではSSI<-2の9事例と全204事例に差がないが、最上流の「刈安」地点から下流域にかけてはSSI<-2の9事例が全204事例より大きな降雨量を示しており、特に中流域の「仙人谷ダム」「小屋平ダム」「出し平ダム」地点においてこの傾向は顕著である。このことは、上空の大気安定度と黒部峡谷内の降雨現象に密接な関係があり、大気の状態が不安定であると黒部峡谷内の特に中下流域に大雨をもたらす可能性があることを示唆しているものと考えられる。

なお、図-2.2.9(c)より、降水時間数の分布は、いずれの降雨規模においても顕著な偏りは見られない。



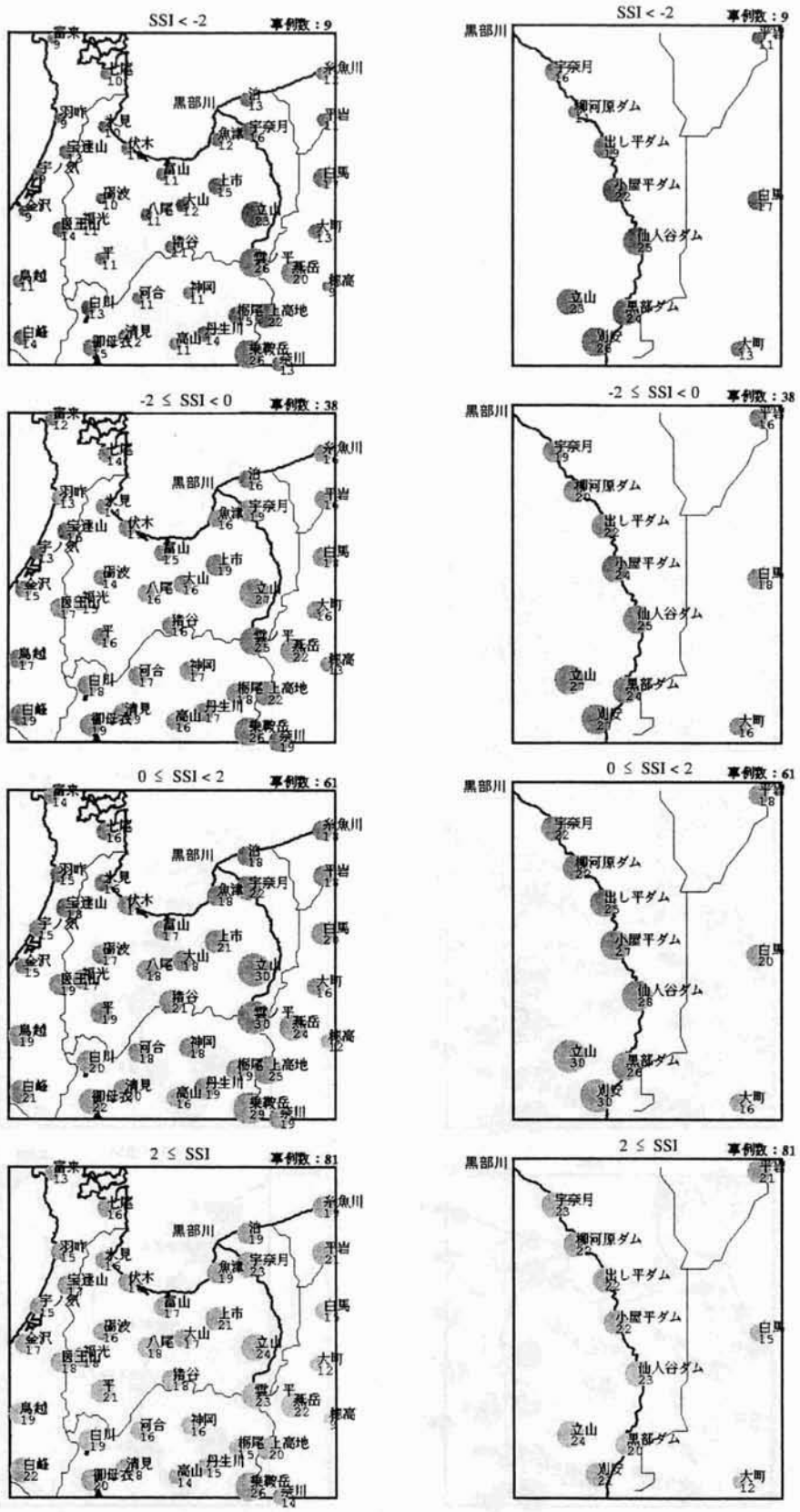
（単位：mm）

図-2.2.9(a)　最大４時間雨量分布図（SSI 階層別）（左：広域、右：狭域）



（単位：mm）

図-2.2.9(b)　最大 24 時間雨量分布図（SSI 階層別）（左：広域、右：狭域）



（単位：時間）

図-2.2.10(c)　降雨時間数分布図（SSI 階層別）（左：広域、右：狭域）

（７）豪雨事例の特性

黒部峡谷内で特に豪雨となった事例を対象として解析を行う。全 204 降雨事例のうち豪雨事例として、出し平ダム地点での最大 4 時間雨量が 90mm を越える 5 事例を抽出した。表-2.2.1 に解析対象豪雨事例を示す。

表-2.2.1　解析対象豪雨事例（全 5 事例）

降雨番号	降雨期間	降雨成因	「出し平ダム」地点の降雨特性値		
			最大 4 時間雨量	最大 24 時間雨量	降雨時間数
122	1995.7.11 – 7.14	前線＋低気圧	139(mm)	341(mm)	53（時間）
140	1996.8.14 – 8.16	台風	101(mm)	214(mm)	21（時間）
157	1997.8.7 – 88	前線	95(mm)	168(mm)	16（時間）
174	1998.7.9 – 7.11	前線	160(mm)	235(mm)	32（時間）
182	1998.9.21 – 9.23	台風	90(mm)	174(mm)	17（時間）

図-2.2.11(a)～(e)に豪雨事例の概要（降雨番号、降雨期間、降雨成因、地上天気図、降雨特性分布図、出し平ダム地点ハイエトグラフ、高層気象データ特性値）を示す。

図-2.2.11(a)～(e)より以下のことがわかる。

①黒部川中下流域で最大 4 時間雨量が極大値をとる降雨番号 122,157,174 の事例の降雨成因は前線である。

②上記 3 事例のうち、出し平地点で最大 4 時間雨量が 120mm 以上となる降雨番号 122,174 の事例は、輪島での SSI の最小値が-2 (K)未満と極めて大気の状態が不安定である。また輪島の高度 850hPa の風向は西風系である。ただし、最大 4 時間雨量が黒部川中下流域で顕著に極大となる降雨番号 174 の事例では、やや北風の成分を含んでいる。

特に黒部川中下流域で豪雨となった事例（降雨番号 122,174）の特徴として、

①前線に起因する降雨

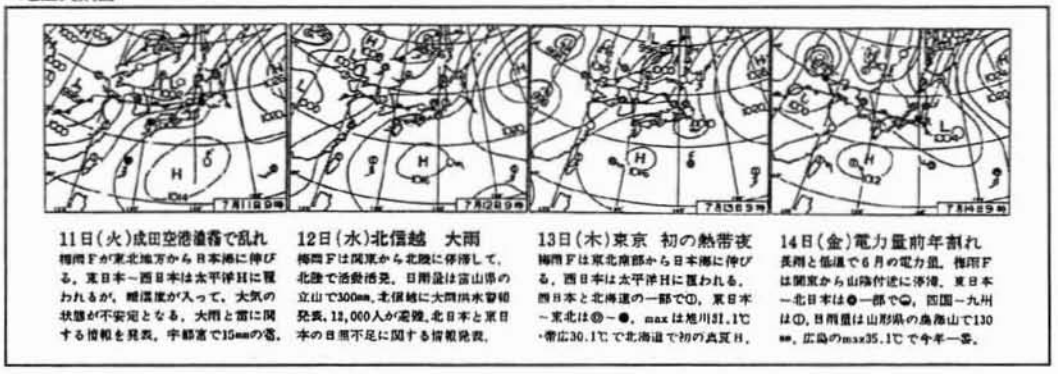
②輪島で観測した SSI の最小値が-2(K) 未満と極めて大気の状態が不安定

③輪島で観測した高層風の風向（高度 850hPa の風向）は西風系

が挙げられることがわかった。

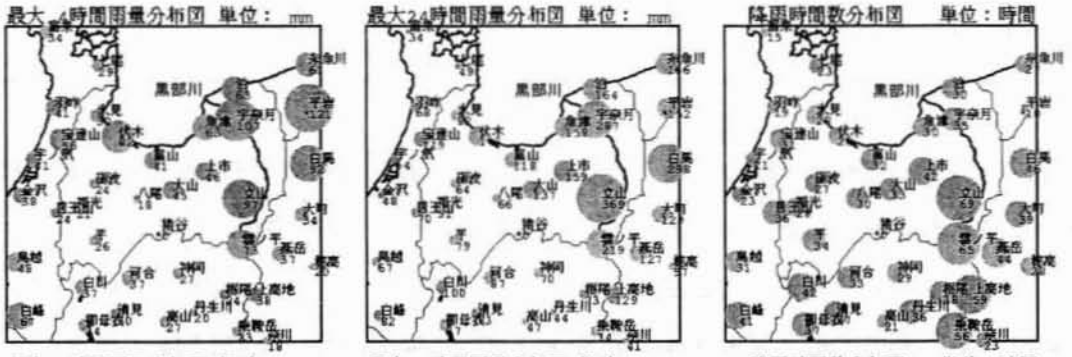
降雨番号:122　　降雨期間:1995.7.11 － 7.14　　降雨成因:前線＋低気圧

地上天気図

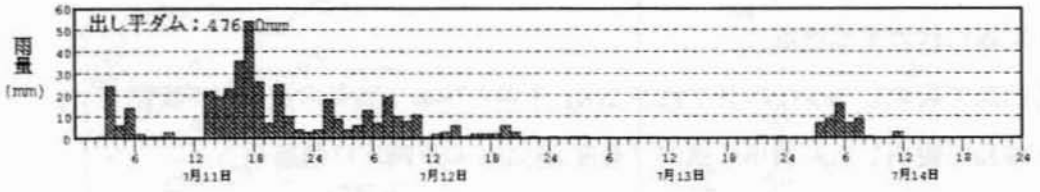


高層気象（気象庁「輪島」）特性値　　****:データ無し

850hPa 平均風速(m/s)	850hPa 平均風向(度)	ＳＳＩ (K)（平均値）	ＳＳＩ (K)（最小値）
13.8	262.0	0.7	-2.6



降雨特性分布図　（上段： 250万分の1　下段： 90万分の1　*:欠測を含む統計値）

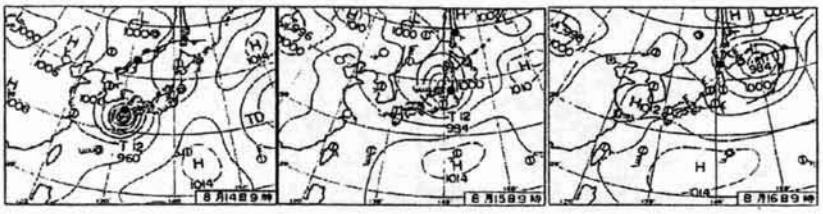


「出し平ダム」地点のハイエトグラフ

図-2.2.11(a)　豪雨事例の概要（降雨番号 122）

降雨番号:140　　**降雨期間**:1996.8.14 - 8.16　　**降雨成因**:　台風

地上天気図



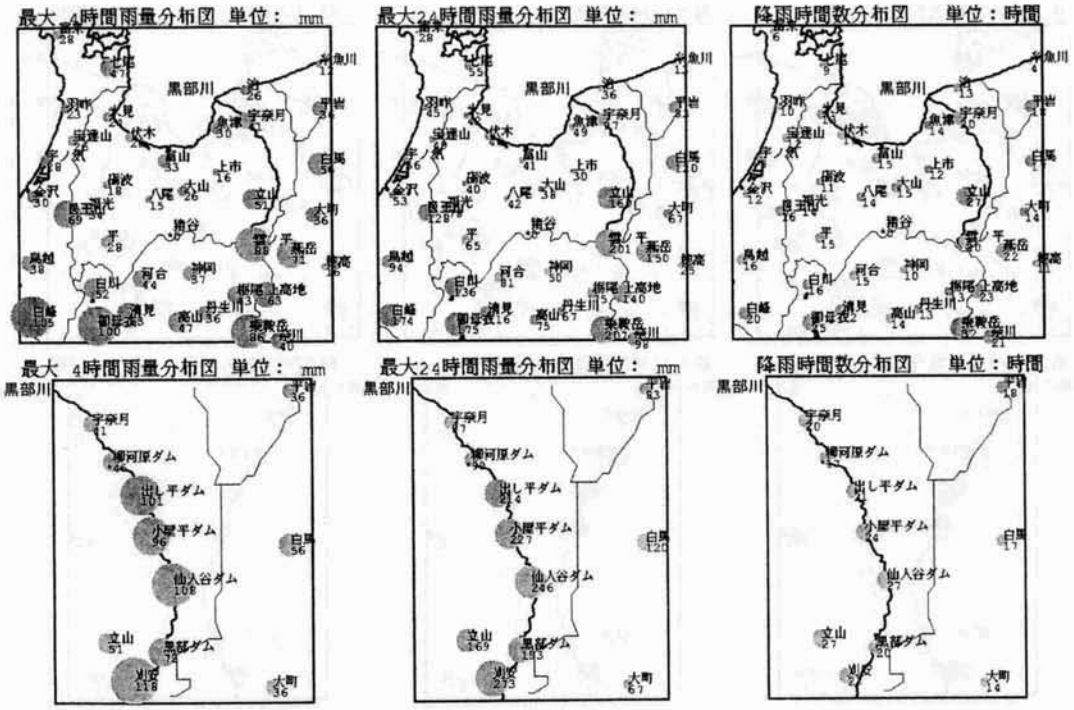
14日(水)台12号上陸
10時過ぎ熊本市付近に上陸，四国沖に出て15時過ぎに山口県の徳山市付近に再上陸，西日本は暴風，鹿児島で58.5m/sの暴風を観測し記録更新．日雨量は宮崎県えびの高原で372mm．

15日(木)関東で猛暑
台12号は日本海沿岸を進み，9時頃新潟県村上市付近に再上陸し，午後東北の東海上へ．maxは水戸38.4℃・宇都宮37.5℃・八王子39.7℃で記録更新．東京38.7℃で2番目の記録．

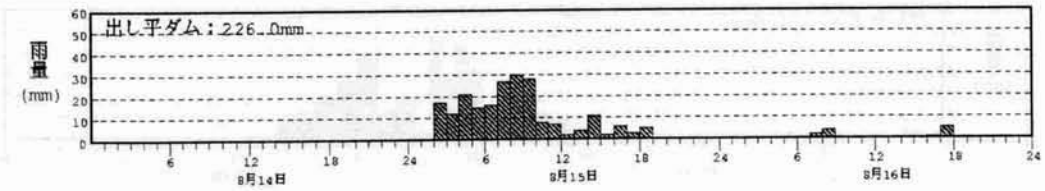
16日(金)取水制限を開始
利根川水系で10%の制限．台12号は北海道の東で温帯低気圧．西日本から東日本は日に覆われる．北海道は●，他は①～③．東京の最小湿度は28%で8月の2位の記録．日光で皿．

高層気象（気象庁「輪島」）特性値　　****:データ無し

850hPa 平均風速(m/s)	850hPa 平均風向(度)	SSI (K)（平均値）	SSI (K)（最小値）
6.9	236.1	1.5	-2.0



降雨特性分布図　（上段： 250万分の1　下段： 90万分の1　*:欠測を含む統計値）

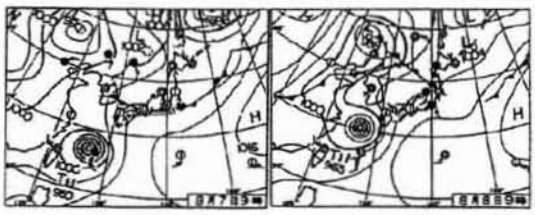


「出し平ダム」地点のハイエトグラフ

図-2.2.11(b)　豪雨事例の概要（降雨番号 140）

降雨番号:157　　**降雨期間**:1997.8.7 - 8.8　　**降雨成因**:　前線

地上天気図



7日(木)台風11号北上

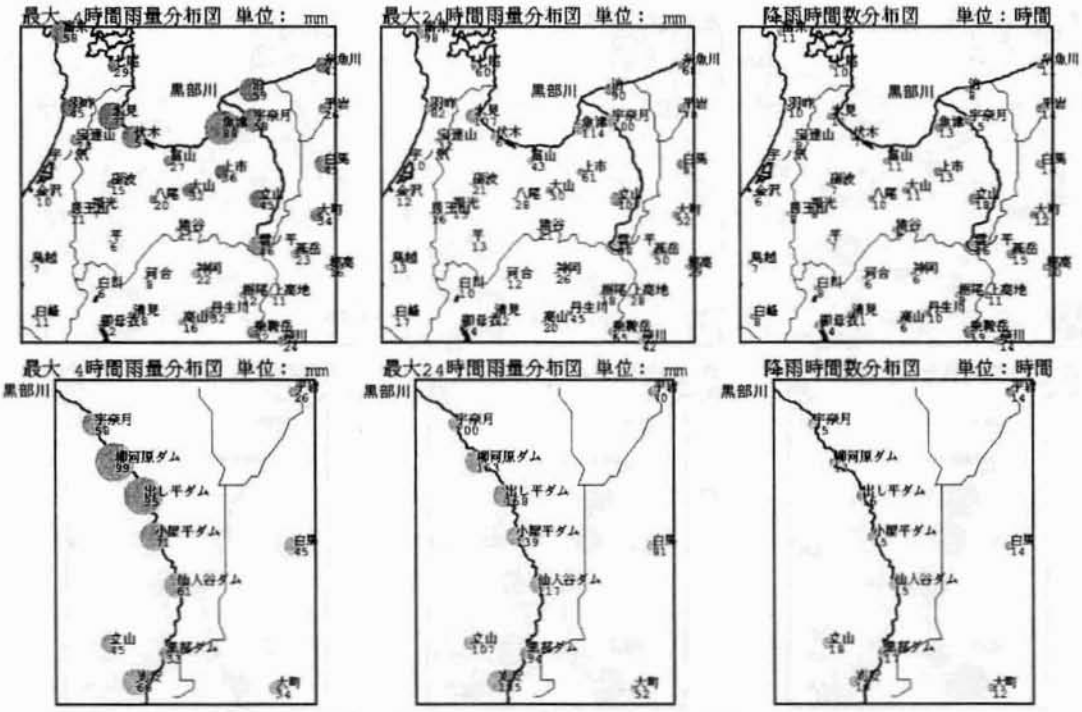
那覇で最大瞬間風速46.3m／s，沖縄島北部で16時に83mm，日降雨504mm，WFに暖湿流が入り，大気不安定で，4時に8月としては観測史上最高の39mmの雨を記録。

8日(金)甲子園始まる

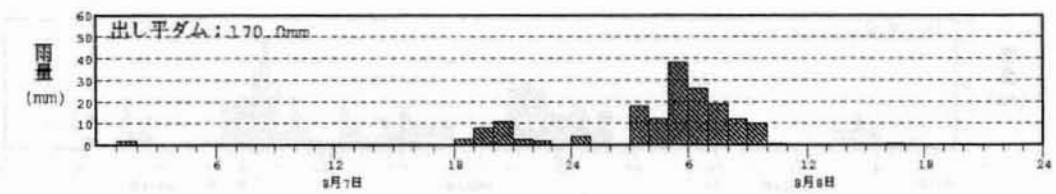
晴天の中，第79回全国高校野球選手権大会が開会，台11号は九州の西を北上，WF刺激され，石川県富来で2時に45mm，南からの暖湿流で，高知県本川は日雨量118mm。

高層気象（気象庁「輪島」）特性値　　****:データ無し

850hPa 平均風速(m/s)	850hPa 平均風向(度)	SSI (K)（平均値）	SSI (K)（最小値）
11.6	252.7	1.5	-0.2



降雨特性分布図　（上段： 250万分の1　下段： 90万分の1　*:欠測を含む統計値）

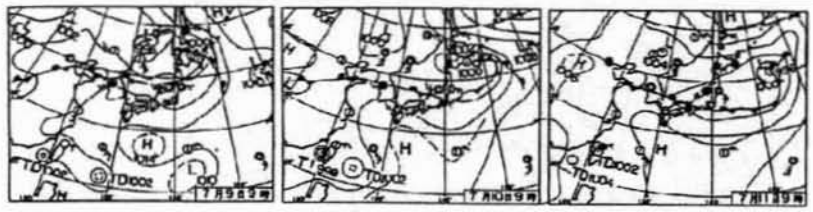


「出し平ダム」地点のハイエトグラフ

図-2.2.11(c)　豪雨事例の概要（降雨番号 157）

降雨番号:174　　**降雨期間**:1998.7.9 - 7.11　　**降雨成因**:　前線

地上天気図



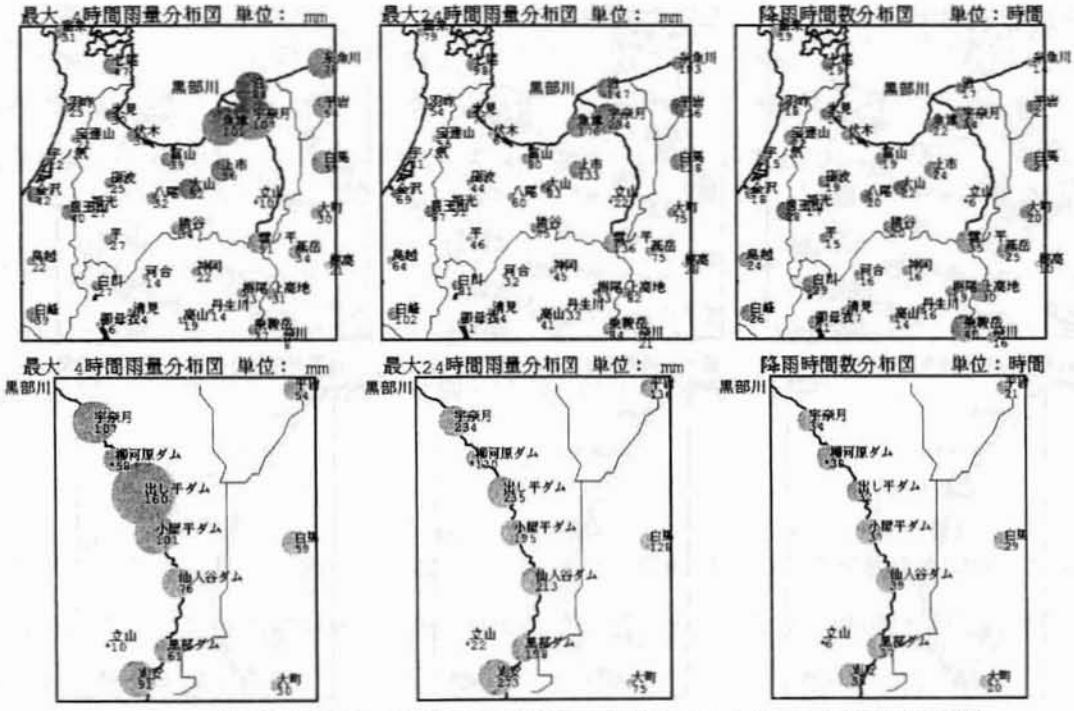
9日(木)台風1号　発生
台湾海峡で熱しが台1号に．1951年以降最も遅い発生．東京や千葉では多数の児童が光化学スモッグの被害．ＣＦが南下．茨城県内では落雷のため約5,800世帯で停電．

10日(金)ＪＲ脱線
長野・新潟県境の北小谷駅で普通列車が線路上の土砂に乗り上げ脱線．前日からの●で地盤が緩む．新潟県能生では19時42mm，日雨量110mm．福井県板垣で日雨量163mm．

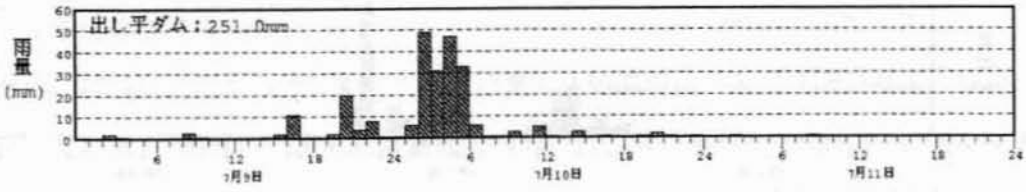
11日(土)山陰　大雨
鳥取県大山で6時57mm，島根県出雲で8時42mm，7時55mm．日雨量は大山の213mmが最高．関東では夜20mm前後の雷●．東京都青梅で23時24mm，茨城県小瀬で15時24mm．

高層気象（気象庁「輪島」）特性値　　****:データ無し

850hPa 平均風速(m/s)	850hPa 平均風向(度)	ＳＳＩ (K)（平均値）	ＳＳＩ (K)（最小値）
8.3	273.5	0.9	-2.2



降雨特性分布図　（上段： 250万分の1　下段： 90万分の1　*:欠測を含む統計値）

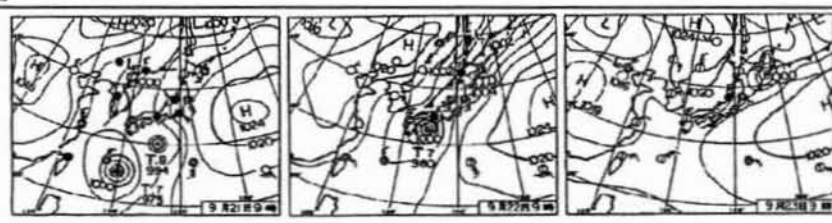


「出し平ダム」地点のハイエトグラフ

図-2.2.11(d)　豪雨事例の概要（降雨番号 174）

降雨番号:182　　**降雨期間**:1998.9.21 - 9.23　　**降雨成因**:　台風

地上天気図



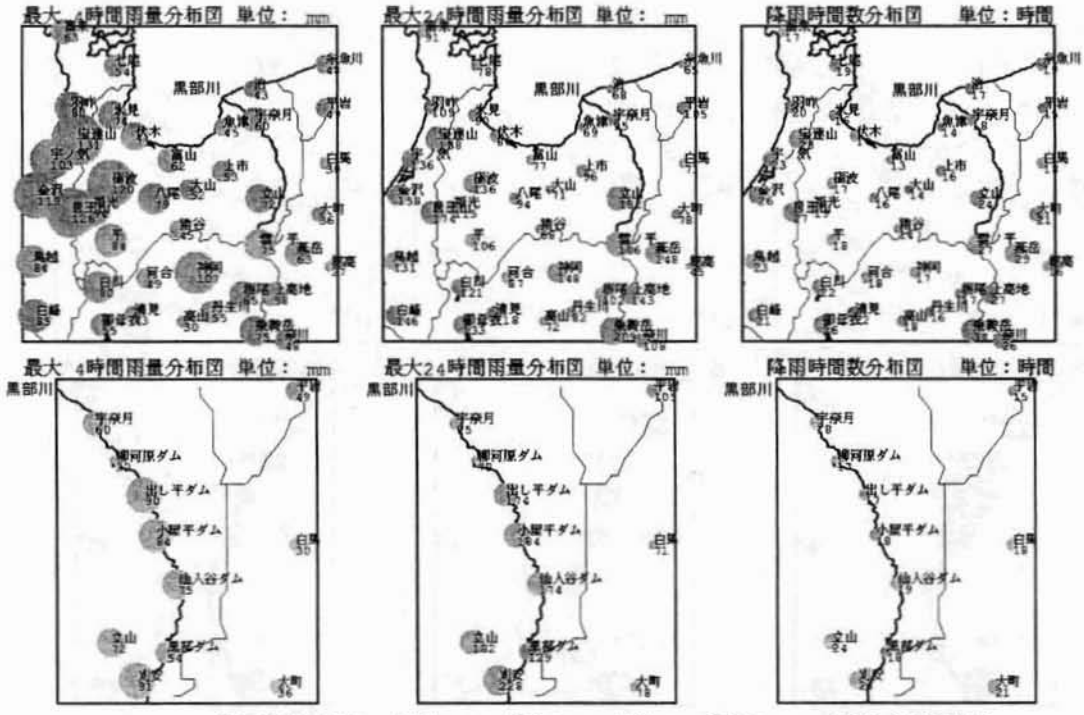
21日(月)台風８号　上陸
台８号は16時前に和歌山県田辺市付近に上陸．1130頃埼玉県深谷市で電巻．トラック横転，建築中の住宅１棟倒壊など被害．時間雨量愛知県作手63mm，三重県桑名57mm．

22日(火)台風７号　上陸
13時過ぎに和歌山県御坊市付近に上陸．西日本では朝から暴風雨．近畿では約８万世帯が停電．徳島県日和佐で12時89mm，13時92mm．室戸岬では最大瞬間風速58.5m/s．

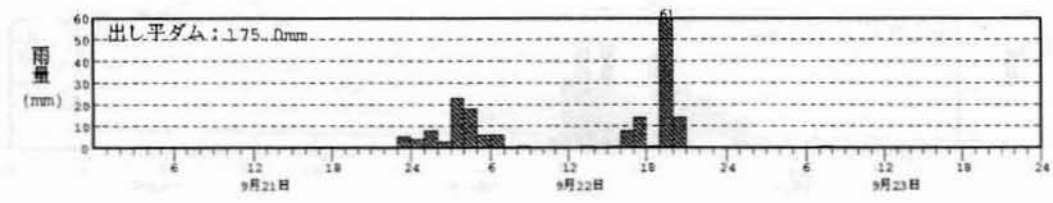
23日(水)北日本・九州晴れ
八戸で最低気圧994.9hPa．台７号は９時TD化．北海道は午前中風強いが次第に青空広がる．Ｆ停滞する関東～中国・四国は○や●．静岡県牧の原で22時～24時151mm．

高層気象（気象庁「輪島」）特性値　　****:データ無し

850hPa 平均風速(m/s)	850hPa 平均風向(度)	SSI (K)(平均値)	SSI (K)(最小値)
7.4	216.2	2.5	-0.9



降雨特性分布図　（上段： 250万分の1　下段： 90万分の1　*:欠測を含む統計値）



「出し平ダム」地点のハイエトグラフ

図-2.2.11(e)　豪雨事例の概要（降雨番号 182）

２．２．３　まとめ

本節では黒部峡谷および周辺の気象・降雨特性を解明するために、40 箇所の気象庁アメダス観測地点および 7 箇所の関西電力観測地点の全 47 地点を対象として、地上雨量データの解析を行った。解析の対象とした降雨は、1988 年～1999 年の 12 年間で、気象庁アメダス観測地点の「立山」、「宇奈月」、「白馬」のいずれかの地点において、一雨（12 時間無降雨で定義）50mm 以上かつ時間雨量 10mm 以上を観測した全 204 降雨事例とした。

その結果、以下の特性が判明した。

（１）全般的な特性

最大 4 時間、最大 24 時間雨量ともに平野部に比べ、山岳域である黒部峡谷付近の降雨量が大きいことがわかる。特に最大 4 時間雨量においてその傾向が顕著である。また、黒部峡谷付近では「立山」、「刈安」の立山稜線～黒部川上流域で、最大 4 時間雨量、最大 24 時間雨量とも極大となる「黒部川上流域降水量極大傾向」が見られる。

（２）降雨成因別特性

今回抽出した全 204 降雨事例は、低気圧、前線＋低気圧、前線、台風のいずれの降雨成因においても「黒部川上流域降水量極大傾向」が見られる。

（３）季節別特性

四季のうちでは夏季が最も降雨量が多く、また「黒部川上流域降水量極大傾向」が顕著に見られる。また降水時間数は冬季に最も大きい値を示しており、降雨時間に比べ降雪時間が長いことを示す。

（４）降雨規模別特性

黒部川中流域に位置する出し平ダム地点の最大 4 時間雨量に基づき降雨規模を層別化して解析した結果、「黒部川上流域降水量極大傾向」は、降雨規模が 15mm 以上 50mm 未満において顕著に見られる。一方、降雨規模が 50mm 以上の場合の最大 4 時間雨量は出し平ダム、小屋平ダム付近の中流域が上流域よりも大きくなる。

（５）高層風の風向別特性

黒部峡谷に最も近い「輪島」での高層風観測値を用いて、黒部峡谷の降雨特性を解析した結果、黒部峡谷の降雨時には南西～西の風向が卓越しており、この風向の時に「黒部川上流域降水量極大傾向」が最も顕著となっている。

（６）大気安定度別特性

大気安定度の指標として「輪島」の高層観測値から算出した SSI（SHOWALTER STABILITY　INDEX）を用いた。

黒部峡谷内の各地点は SSI が小さくなる、すなわち大気の状態が不安定になるのにともない、降雨量が大きくなる傾向がある。また SSI<-2 の階層、すなわち最も大気の状態が不安定な事例では、「立山」地点ではその他の事例と差がないが、黒部峡谷内の最上流の「刈安」地点から下流域にかけてはその他事例に比べ大きな降雨量を示しており、特に中流域の「仙人谷ダム」「小屋平ダム」「出し平ダム」地点においてこの傾向は顕著である。このことは、上空の大気安定度と黒部峡谷内の降雨現象に密接な関係があり、大気の状態が不安定であると黒部峡谷内の特に中下流域に大雨をもたらす可能性があることを示唆している。

（７）豪雨事例の特性

出し平ダム地点での最大 4 時間雨量が 90mm を越える豪雨事例 5 事例を対象として解析を行った結果、前線に起因する降雨で、輪島での SSI の最小値が-2(K)未満と極めて大気の状態が不安定、さらに輪島の高層風向は西風系の場合、特に黒部川中下流域で豪雨となっていることがわかった。

２．３　黒部峡谷および周辺地域を対象とした気象・降雨観測

本研究では、黒部峡谷および周辺地域の気象・降雨特性をそのメカニズムレベルまで踏み込んで解明することを目的として、表-2.3.1 および図-2.3.1 に示す要領で観測を実施した。黒部峡谷周辺の降雨・気象特性の把握のために富山平野にドップラーレーダーを設置・観測し、また黒部峡谷内の気象・降雨特性把握のため黒部ダムサイトおよび立山（浄土山）に X-band ミニレーダーを設置・観測するとともに、黒部峡谷内および周辺の気象場を把握するために、黒部ダムサイト（1998～2000 年）および富山平野内の上市町（2001 年）において GPS ゾンデ観測を実施した。本節では、まず用いた観測装置・方法について説明を行う。つぎに、1998 年の観測から、急峻な山岳域から形成される黒部峡谷を対象として、気象・降雨特性を把握するための観測手法の有効性を評価した結果を述べる。最後に、1999～2001 年の梅雨期に実施した集中観測結果および降雨予測手法への展開について論じる。

表-2.3.1　観測項目

観測年	地点	緯度	経度	観測項目	観測期間
1998	黒部ダムサイト	36 度 33 分 45 秒	137 度 40 分 3 秒	X-band ミニレーダー	8 月 10 日～8 月 28 日
				GPS ゾンデ	9 月 24 日～9 月 29 日
1999	開発駅前	36 度 37 分 30 秒	137 度 14 分 45 秒	ドップラーレーダー	6 月 10 日～7 月 21 日
				地上雨量	6 月 3 日～8 月 2 日
	浄土山	36 度 33 分 49 秒	137 度 36 分 34 秒	X-band ミニレーダー	6 月 24 日～6 月 30 日
				地上雨量・気温・湿度	6 月 13 日～8 月 25 日
	黒部ダムサイト	36 度 33 分 45 秒	137 度 40 分 3 秒	X-band ミニレーダー	6 月 24 日～6 月 30 日
				GPS ゾンデ	
	祖母谷山荘	36 度 41 分 38 秒	137 度 40 分 38 秒	地上雨量	6 月 4 日～9 月 30 日
2000	開発駅前	36 度 37 分 30 秒	137 度 14 分 45 秒	ドップラーレーダー	5 月 27 日～7 月 21 日
				地上雨量	5 月 24 日～7 月 24 日
	浄土山	36 度 33 分 49 秒	137 度 36 分 34 秒	地上雨量・気温・湿度・風向・風速	6 月 7 日～7 月 26 日
	黒部ダムサイト	36 度 33 分 45 秒	137 度 40 分 3 秒	X-band ミニレーダー	6 月 25 日～7 月 2 日
				GPS ゾンデ	6 月 27 日～7 月 2 日
	祖母谷山荘	36 度 41 分 38 秒	137 度 40 分 38 秒	地上雨量	6 月 14 日～9 月 11 日
2001	開発駅前	36 度 37 分 30 秒	137 度 14 分 45 秒	ドップラーレーダー	6 月 7 日～7 月 13 日
				地上雨量	6 月 7 日～7 月 13 日
	浄土山	36 度 33 分 49 秒	137 度 36 分 34 秒	地上雨量・気温・湿度・風向・風速	5 月 29 日～7 月 16 日
	上市町（富山県薬用植物指導センター）	36 度 42 分 51 秒	137 度 23 分 24 秒	GPS ゾンデ	6 月 30 日～7 月 1 日
	祖母谷山荘	36 度 41 分 38 秒	137 度 40 分 38 秒	地上雨量	6 月 6 日～8 月 27 日

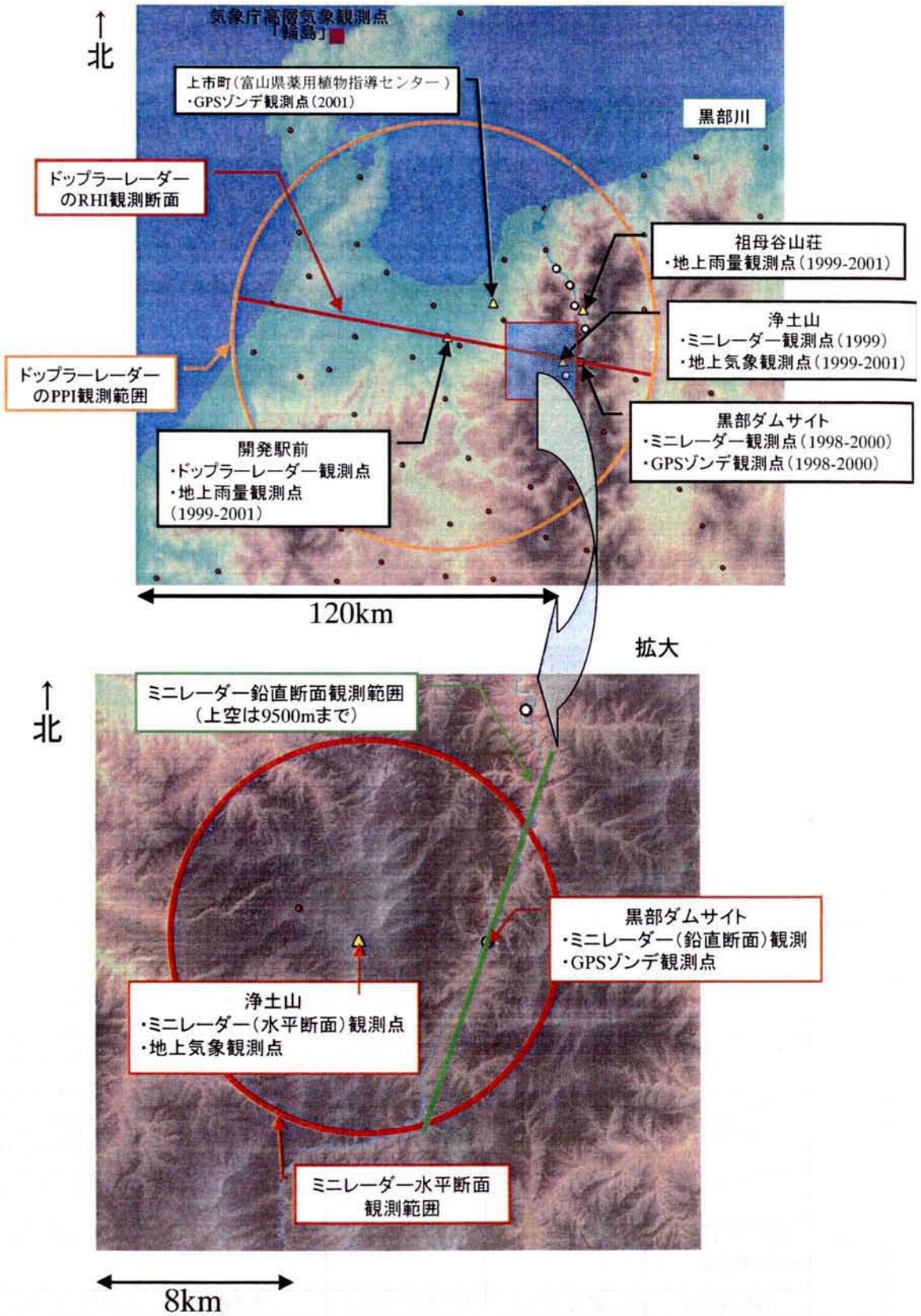


図-2.3.1　観測全体図

（●：気象庁アメダス観測点　○：関西電力雨量観測点　▲：本研究による臨時観測点）

２．３．１　観測装置および方法

（1）X-band ミニレーダー観測

X-band ミニレーダー観測は、黒部峡谷の鉛直断面観測を目的に京都大学防災研究所所有のレーダーを黒部ダム展望台（1998 年）およびダム管理所屋上(1999 年)に設置、水平断面観測を目的に日本気象協会所有のレーダーを、立山（浄土山）の富山大学理学部立山研究室敷地内（1999 年）およびダム管理所屋上(2000 年)に設置して実施した。ともに周波数 9,410MHz、出力 10kW、ビーム幅 20 度の船舶用ミニレーダーである。

図-2.3.2、図-2.3.3 にそれぞれ黒部ダムサイト、立山（浄土山）における設置状況を、図-2.3.4 に観測データの処理フローを示す。

黒部ダム管理所屋上（1999 年）

黒部ダム展望台（1998 年）

図-2.3.2　黒部ダムサイトにおける X-band ミニレーダー設置状況（鉛直断面観測）

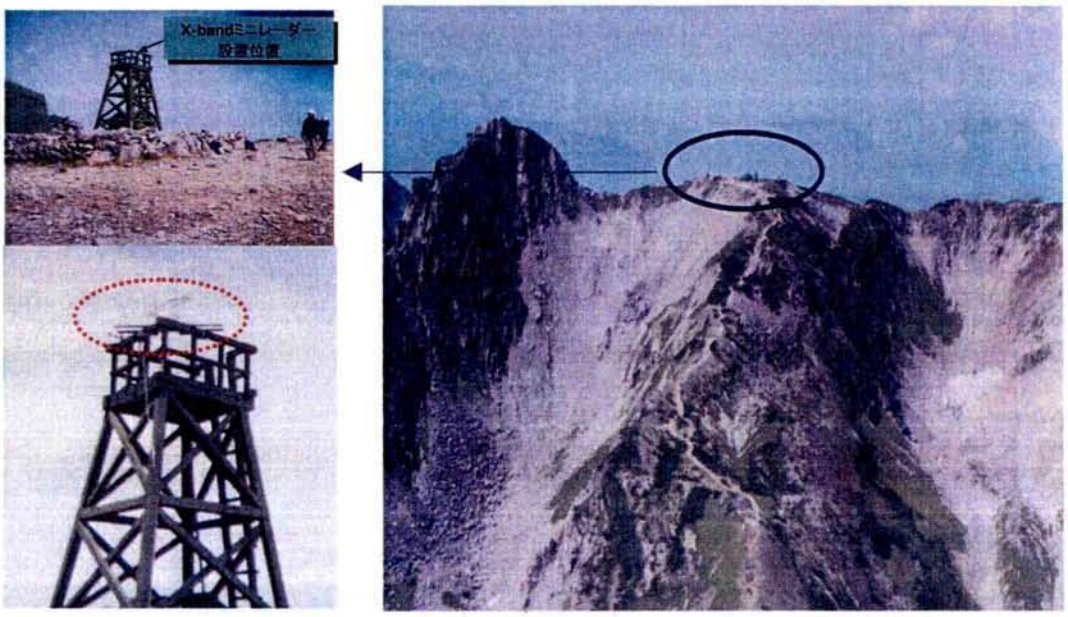
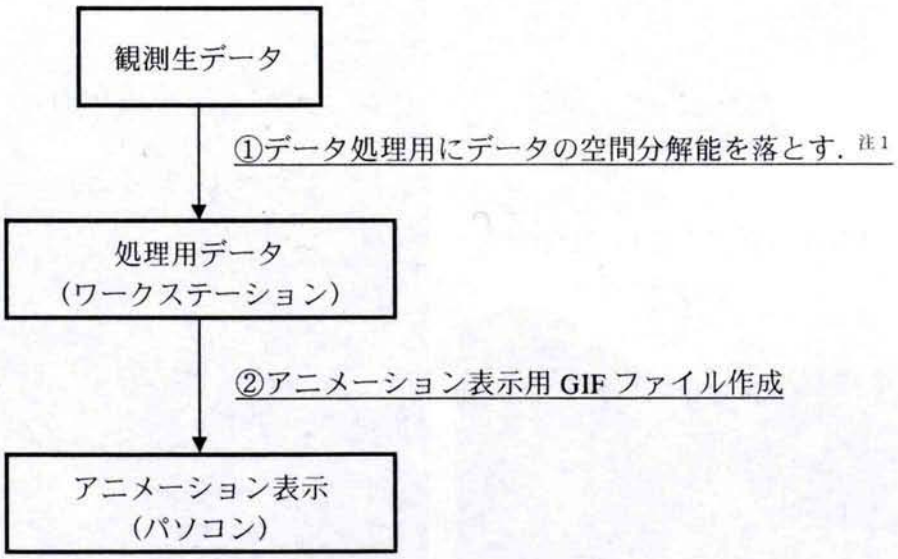


図-2.3.3　立山（浄土山）における X-band ミニレーダー設置状況（水平断面観測）



注 1）生データは 1024x1024 の各メッシュに 0-15 のデータが入っているが，4x4=16 メッシュのデータを平均することで 256x256 に空間分解能を落とし，データサイズを圧縮した．

図 2.3.4　X-band ミニレーダーのデータ処理フロー

（2）GPS ゾンデ観測

GPS ゾンデにより上空の気温、湿度、風向・風速を観測した。GPS ゾンデを観測機器として選択した理由は、追尾型のゾンデでは、黒部峡谷での観測を考慮した場合、データの受信が不可能であると考えたためである。

黒部ダムサイトにおける観測は、黒部ダム管理所前の敷地で実施し、データ受信用のアンテナはダム管理所屋上に設置した。観測は、ゴム気球にヘリウムガスを充填し、これにパラシュートおよび GPS ゾンデを接続して放球することにより実施した。生データの収録間隔は、気温、湿度、気圧データが 1 秒毎、風データが 5 秒毎である。

図-2.3.5 に GPS ゾンデ観測状況を、図-2.3.6 に GPS ゾンデのデータ処理フローを示す。

図-2.3.5　　GPS ゾンデ観測状況（黒部ダムサイト）

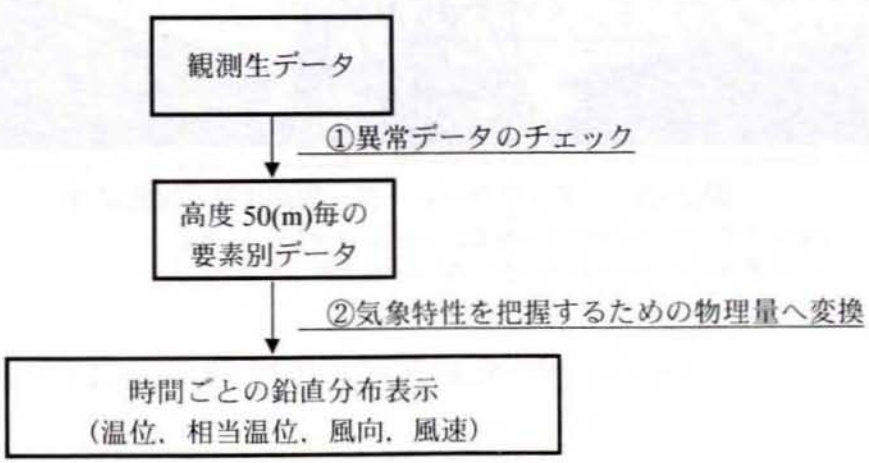


図 2.3.6　GPS ゾンデのデータ処理フロー

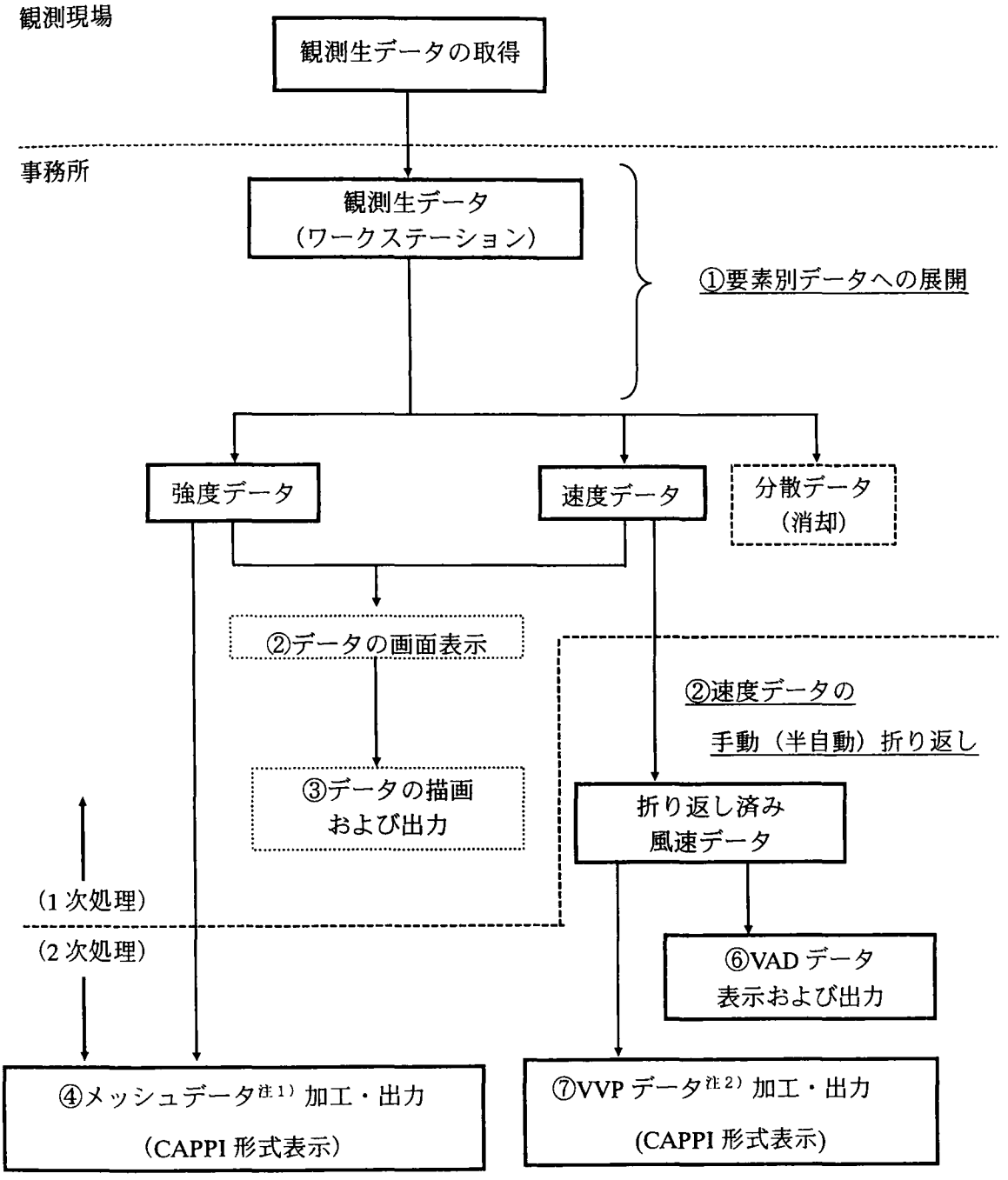
（３）ドップラーレーダー観測

ドップラーレーダーは富山地方鉄道の開発駅前の関西電力社有地に設置して観測した。観測に用いたドップラーレーダーは、周波数 9,445MHz±6MHz、ビーム幅 1.3 度以下、駆動範囲が方位角軸 0～360 度、仰角軸-2～90 度、ドップラー観測範囲 64ｋｍの機能を有す。

観測方法として、16 仰角（0-20 度）の PPI（Plane Position Indicator）観測（平面観測）、2 方位（102 度および 282 度）の RHI（Range Height Indicator）観測（鉛直断面観測）（1999 年）、18 仰角（0-30 度）の PPI 観測（2000～2001 年）で実施した。

図-2.3.7 に観測状況、図-2.3.8 にドップラーレーダーのデータ処理フローを示す。なお、3 次元風データの作成には、簡略化 VVP 法 [2)]を用いた。

図-2.3.7　　ドップラーレーダー観測状況（開発駅前）



注 1）水平分解能 1(km)，鉛直分解能 250(m)，上端高度 6(km)
注 2）水平分解能 5(km)，鉛直分解能 500(m)，上端高度 6(km)

図-2.3.8　ドップラーレーダーのデータ処理フロー

２．３．２　観測手法の有効性検討

まず、黒部峡谷内の気象・降雨現象を把握するための測器である X-band ミニレーダーおよび GPS ゾンデについて、現地観測により観測手法の有効性検討を行った。なお、ドップラーレーダーは気象観測機器として十分に実績がある点と、設置場所が富山平野という平野部であることから、観測手法の有効性を評価するための予備的な観測は不要であると判断した。

（１）X-band ミニレーダー観測

黒部ダムサイトおいて、1998 年 8 月 10 日～28 日の期間で夕刻 18 時から早朝 7 時にかけて降雨があった時刻帯に、X-band ミニレーダー観測を実施した。

表-2.3.2 にミニレーダー観測日時を示す。

表-2.3.2　X-band ミニレーダー観測日時

番号	観測開始時刻	観測終了時刻	観測時間 (hr)	総雨量 (mm)	最大１時間雨量 (mm)	最大10分雨量 (mm)	備考
1	8/12 02:30	8/12 06:00	3.5	30.5	10.0	5.0	
2	8/15 18:10	8/16 05:10	11.0	26.0	9.0	5.0	
3	8/17 19:15	8/17 21:45	2.5	7.0	4.0	-	
4	8/22 20:30	8/22 21:30	1.0	0.0	0.0	0.0	晴天エコー観測

注）総雨量・最大１時間雨量・最大 10 分雨量は関西電力（株）の「黒部ダム」観測地点の雨量データを用いた。

まず、観測対象となった期間の気象・降雨の状況について述べる。

図-2.3.9 は 1998 年 8 月 12～18 日の期間の黒部ダム地点における降水量の経時変化である。黒部ダム地点で総雨量 428mm を記録している。

図-2.3.10 に最も降雨が強かった 8 月 12 日 12 時のひまわり画像を、図-2.3.11 に 8 月 12 日 9 時の地上天気図を示す。梅雨前線沿いに雨雲が次々と発生し、黒部峡谷上空に非常に強い雨雲がかかっている様子を見ることができる。

図-2.3.12 に 8 月 12～18 日の気象庁アメダス観測点および黒部峡谷内の関西電力雨量観測点における降水量の総雨量分布図を示す。また、図-2.3.13 に気象庁の高層観測点「輪島」の上空 850hPa～600hPa 高度（約 1,500～4,500m）の風向・風速を示す。

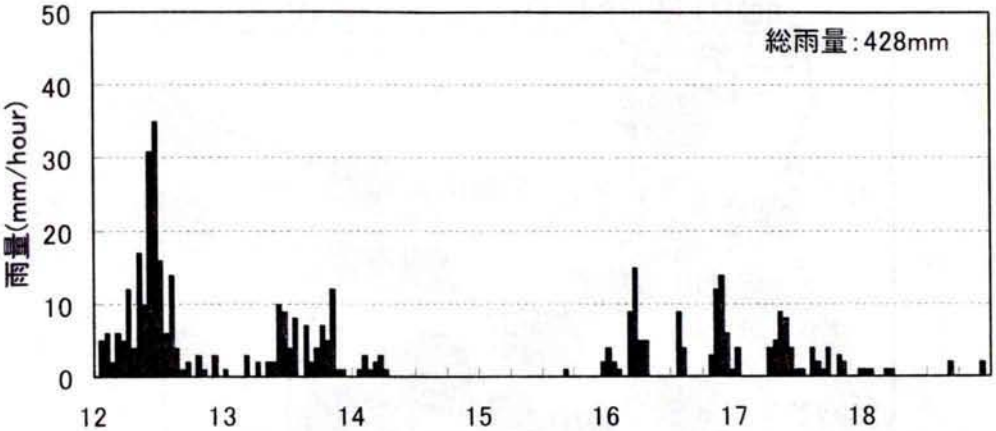


図-2.3.9　黒部ダム地点における降水量時間変化（1998 年 8 月 12 日～18 日）

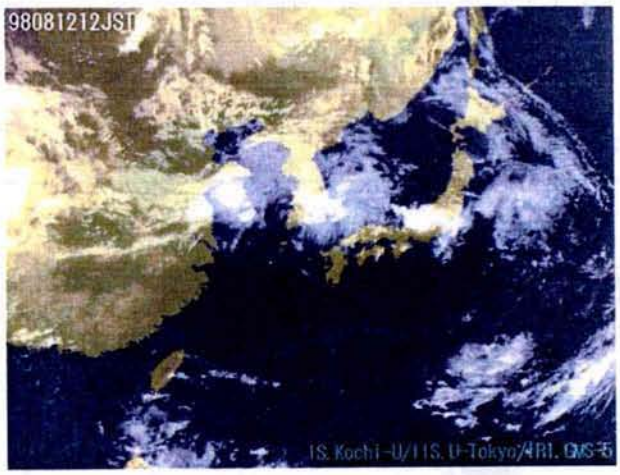


図-2.3.10　ひまわり画像（1998 年 8 月 12 日 12 時）

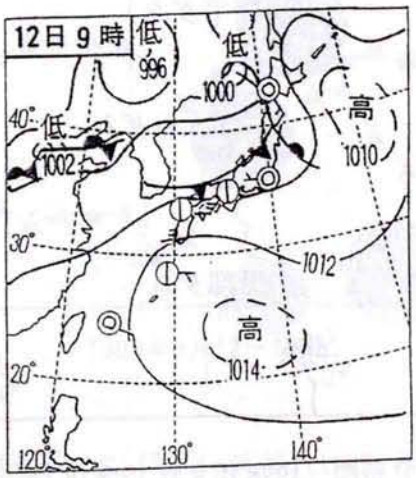
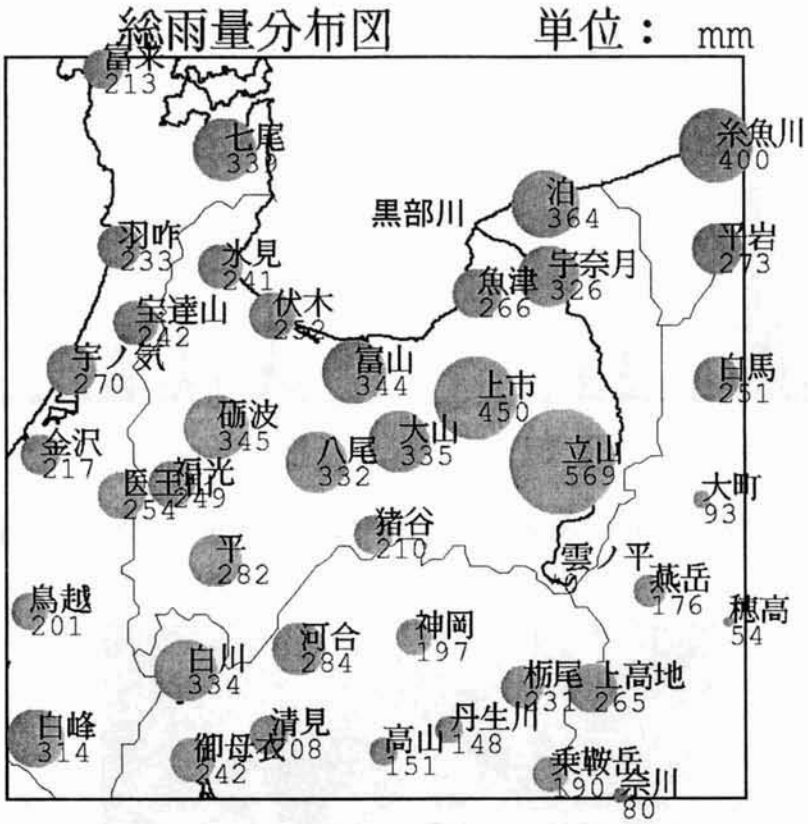


図-2.3.11　地上天気図（1998 年 8 月 12 日 9 時）



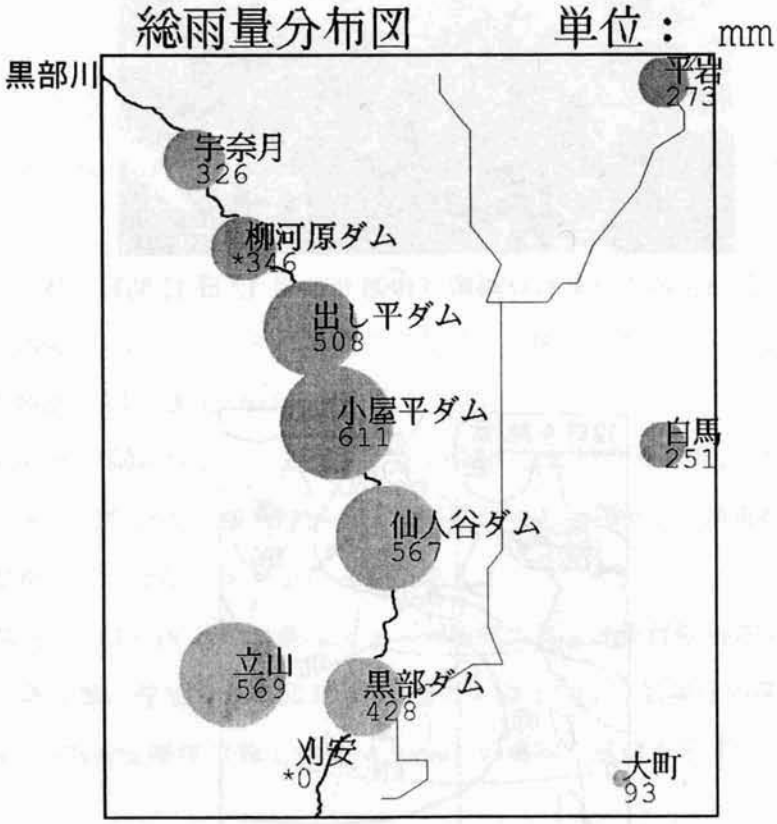


図-2.3.12　総雨量分布図（1998 年 8 月 12～18 日）（*：欠測を含む）

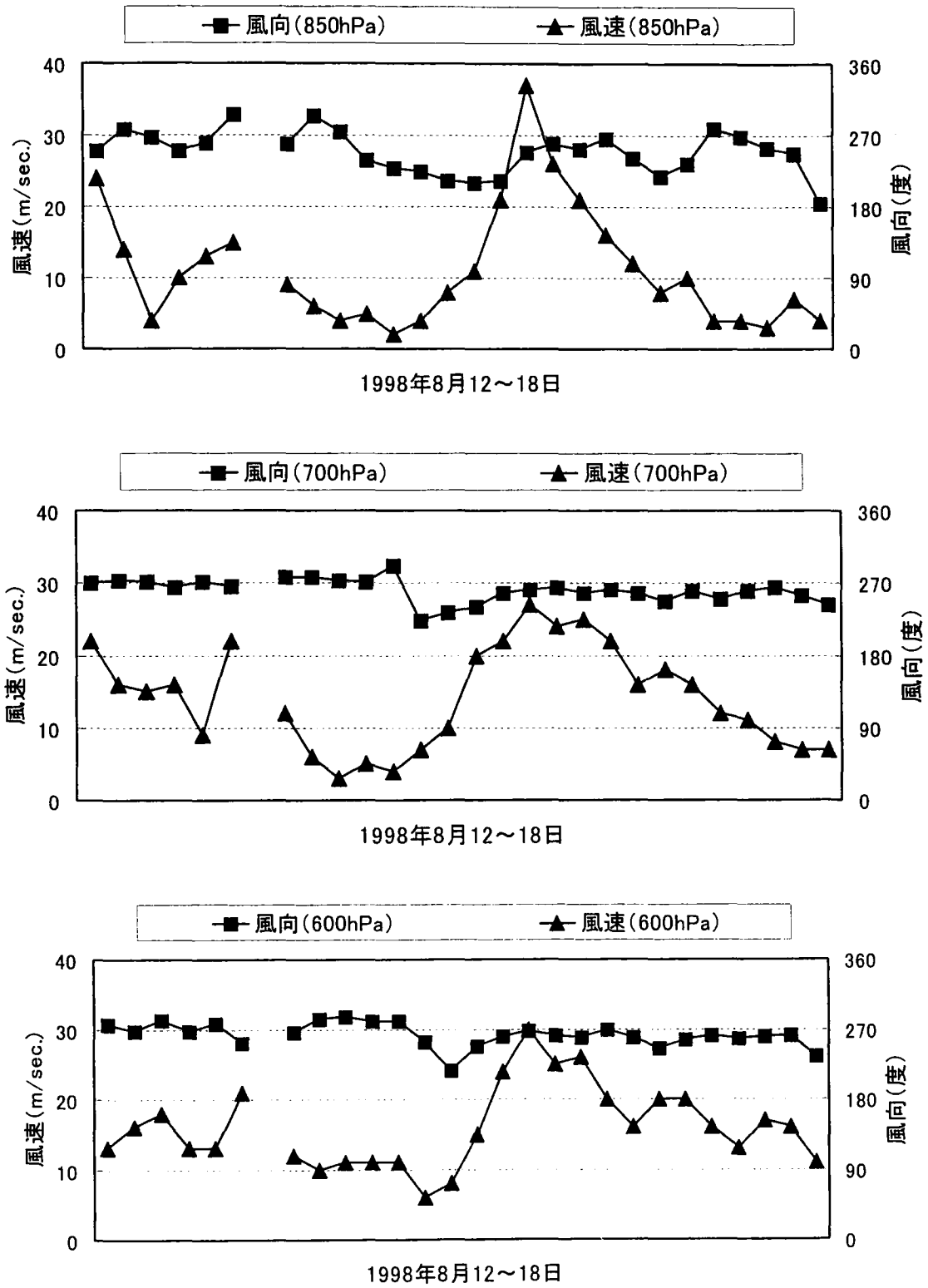


図-2.3.13　輪島の高層気象観測データ（風向・風速）（1998 年 8 月 12 日～18 日）

図-2.3.12 における各地点の降水量より以下のことがわかる。

①「富山」から「上市」、「立山」と山岳域に近づくにつれ、総雨量は 344mm、450mm、569mm と多くなる。

②「小屋平ダム」では「立山」を上回る 611mm の総雨量を記録しており、「黒部ダム」でも「立山」と比較すると少ないものの、428mm の総雨量を記録している。

③黒部峡谷を越えた東側の「大町」の総雨量は 93mm にとどまっている。

図-2.3.13 に示すように、上空 850hPa～600hPa 高度の風は、西～南西であり、雨域は西～南西方向から移動してきたものと考えられる。このことから、本観測期間の降雨は、上空の西風に流され富山平野方面から移動してきた雨域が、立山、黒部峡谷で雨を落としきり、その後東側へ抜けていったものと考える。

以上のような降雨状況の中、今回、X-band ミニレーダーによって黒部峡谷内における降雨現象を観測した。以下に観測結果について詳述する。

図-2.3.14 に 8 月 12 日における、3 時～6 時の気象庁レーダーアメダス雨量分布図を示す。同図より、富山平野から移動してきた雨域が立山および黒部峡谷で雨を降らせ、大幅に衰弱し東に抜けている様子がわかる。

同時期の観測結果として、図-2.3.15 に X-band ミニレーダーによる 4 時 31 分 00 秒～4 時 36 分 30 秒の間の 30 秒ごとの観測画面を示す。また、図-2.3.13 に「黒部ダム」における 4 時 20 分～5 時 10 分の間の 10 分毎の降水量の時間変化を示す。これらの図から、以下のことがわかる。

①黒部峡谷内の降水現象を、黒部川に沿いの鉛直断面で観測できている。

②4 時 32 分～36 分頃に観測地点直上（図-2.3.15 における緑色の楕円部分）および南側上空（同、赤色の楕円部分）に強い降雨セルが観測されており、各降雨セルが観測地点に向かって落下していく状況をみることができる。また、図-2.3.16 の「黒部ダム」の地上雨量時間変化図においては 4 時 30 分～40 分の 10 分間で 5mm（時間雨量換算で 30mm/hour）となっており、地上の雨量強度とレーダー観測に見られる降雨エコー強度は良好な対応関係にある。

③レーダー観測画面のエコーから個々の降雨セルのスケールを大まかに見積もると、1km のオーダーである。

④レーダー観測画面の時間変化から個々の降雨セルの落下速度を大まかに見積もると、10m/sec のオーダーである。

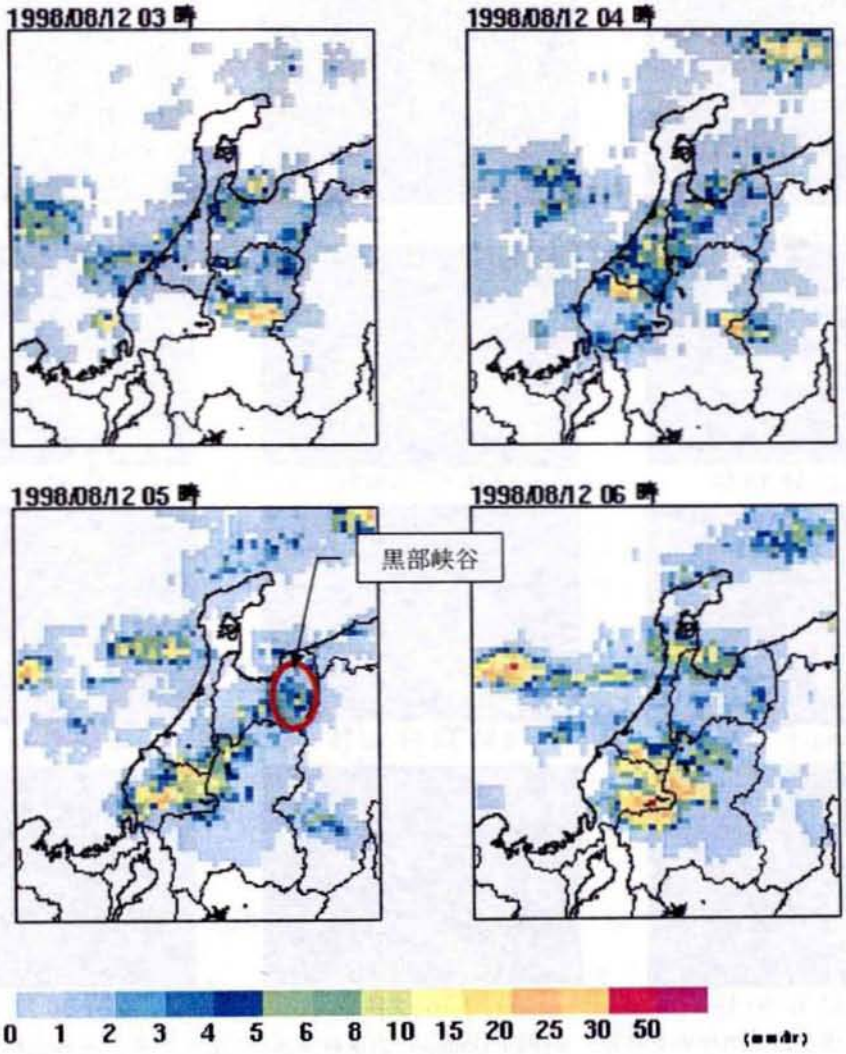
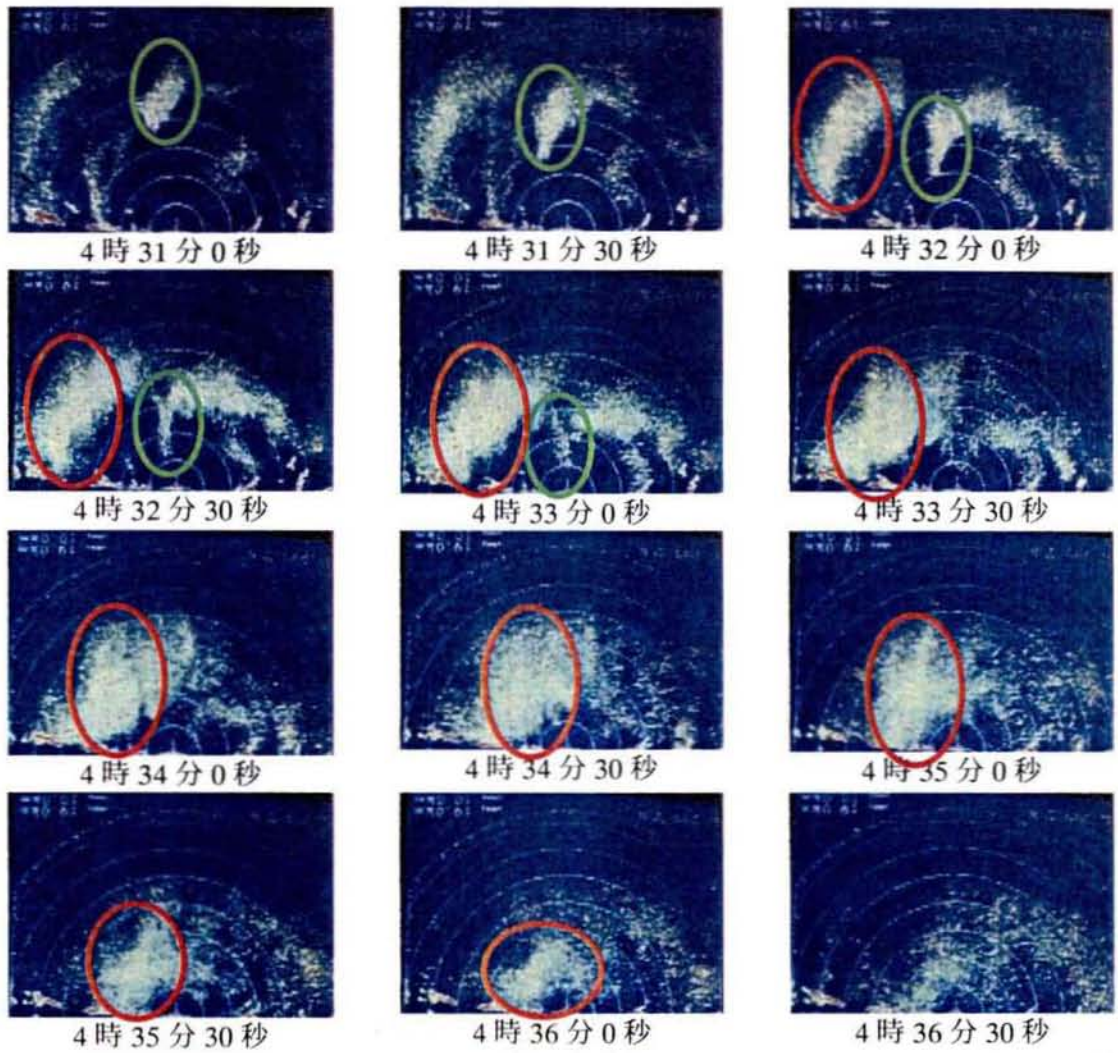


図-2.3.14　気象庁レーダーアメダス雨量分布図（1998 年 8 月 12 日 3 時～6 時）

以上に示したとおり、X-band ミニレーダーによる観測により、これまでとらえることのできなかった黒部峡谷内の降雨セルの可視化に成功した。また、大まかではあるが個々の降雨セルの大きさ、落下速度といった特徴をとらえることに成功した。また、地上雨量と観測されたエコー強度の対応関係も良いものであった。今回の観測は、X-band ミニレーダーの設置位置の関係で鉛直断面の観測にとどまってはいるが、黒部峡谷内の気象・降雨特性解明に有効であると評価できるものと考える。



注）観測地点は各画面の中央であり、半径約 3,000m の鉛直断面図を示している。各画面において、右側が白馬岳の方向（北北東）、左側が赤牛岳の方向（南南西）であり、紙面の裏側が富山平野側（西北西）、表側が大町側（東南東）に相当する。また、エコーは黄色から赤になるほど強いエコーであることを示している。各画面下方で常に見える赤く強いエコーは地形のエコーである。）

図-2.3.15　X-band ミニレーダー観測画面
（1998 年 8 月 12 日 4 時 31 分 00 秒～4 時 36 分 30 秒：30 秒毎）

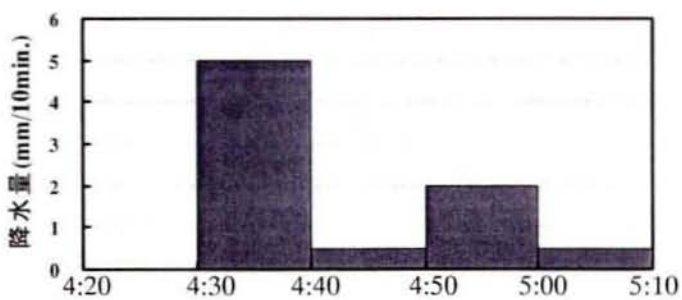


図-2.3.16　黒部ダムにおける降水量の時間変化
（1998 年 8 月 12 日 4 時 20 分～5 時 10 分：10 分毎）

（2）GPS ゾンデ観測

1998 年 9 月 24 日 15 時にテスト観測を行い、その後 9 月 25 日から 29 日の期間に黒部ダムサイトにおいて 9 時、15 時、21 時の 1 日 3 回、GPS ゾンデによる高層気象観測を行った。表-2.3.3 に観測一覧を示す。ゾンデの周波数の同調が不完全であったため、受信不良によって観測が終了したケースが一度あったが、それ以外のケースでは観測は順調に行われ、後述の気象庁の高層気象観測との相関からみても観測データの信頼性は十分であったと判断される。

表-2.3.3　観測一覧（1998 年）

番号	放球時刻	最終到達高度(m)	終了方法*	番号	放球時刻	最終到達高度(m)	終了方法
1	9/24 14:48	13,000	B	9	9/27 14:33	13,000	M
2	9/25 08:46	3,600	F	10	9/27 20:38	11,000	M
3	9/25 14:33	11,000	M	11	9/28 09:00	19,000	B
4	9/25 21:01	9,000	M	12	9/28 14:42	13,000	M
5	9/25 08:41	18,000	B	13	9/28 20:38	11,000	M
6	9/26 14:44	13,000	M	14	9/29 08:46	13,000	M
7	9/26 20:38	14,000	M	15	9/29 14:42	13,000	M
8	9/27 08:46	10,000	M	16	9/29 20:37	11,000	M

*）終了方法　B：気球破裂、F：受信不良、M：マニュアル終了

以下に GPS ゾンデによる観測の有効性を顕著に示しているとみられる、9 月 26 日 21 時の事例（観測番号 7）について、図-2.3.17 に観測時のひわまり画像を、図-2.3.18 に観測時の天気図を示す。「黒部ダムサイト」における観測結果と「輪島」における気象庁の高層観測の結果を図-2.3.19 に示す。

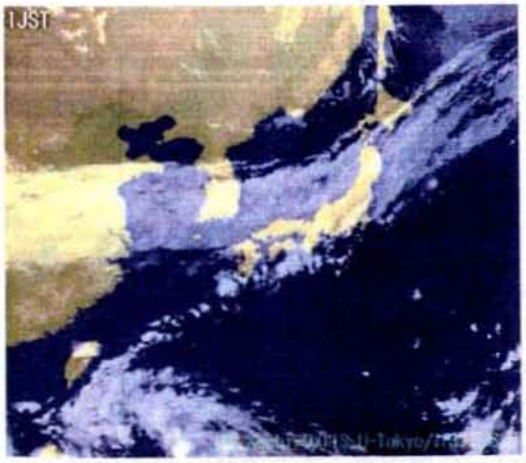


図-2.3.17　観測時のひわまり画像

（1998 年 9 月 26 日 21 時）

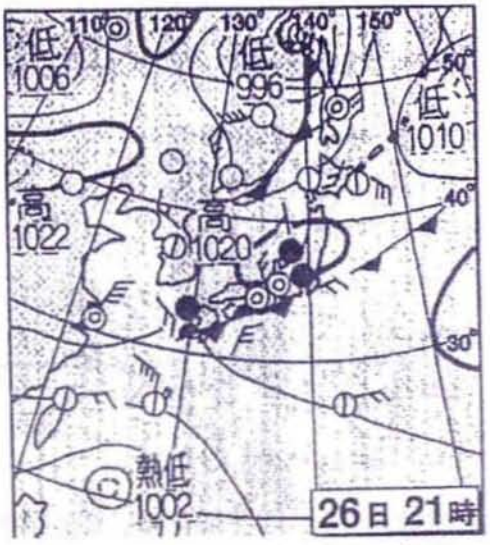


図-2.3.18　観測時の地上天気図

（1998 年 9 月 26 日 21 時）

図-2.3.17、図-2.3.18 から分かるように観測時の気象状況は、秋雨前線の影響を受けて降雨が発生しやすい状況であり、観測地点の天候は曇りであった。

図-2.3.19 より「黒部ダムサイト」における GPS ゾンデ観測結果と「輪島」における気象庁高層気象観測結果は大局的にみて概ね一致しており、このことは GPS ゾンデによる観測の精度が気象庁の高層気象観測と同程度に信頼性があることを示していると考える。一方、同図から「黒部ダムサイト」の気温データの高度 2000m 前後に厚さ約 300m、気温差約 3℃の逆転層が見られ、その逆転層において湿度が約 90％から 70%に変化し、風向はこの層より下では南南西の風（黒部峡谷に沿って上流側から下流側へ吹く風）であるのに対して、この層より上では西風（左岸側から右岸側へ吹く風）となっていることがわかる。この特徴は「輪島」の観測データではとらえておらず、この GPS ゾンデ観測により、黒部峡谷内固有の気象状況をとらえたものと言える。黒部川水系の降雨特性を解明するためには、降雨時の黒部峡谷を含む広領域と黒部峡谷内の狭領域における気象状況の関係、および黒部峡谷内の大気の詳細な状態についての知見が必要となる。今回の観測によって、GPS ゾンデ観測が、黒部峡谷内および黒部峡谷を含む広領域の大気の状態を把握するための、有効な手段であることがわかった。

以上のとおり、X-band ミニレーダー、GPS ゾンデ観測ともに、黒部峡谷の気象・降雨特性を解明する上で有効な手法であることを確認した。

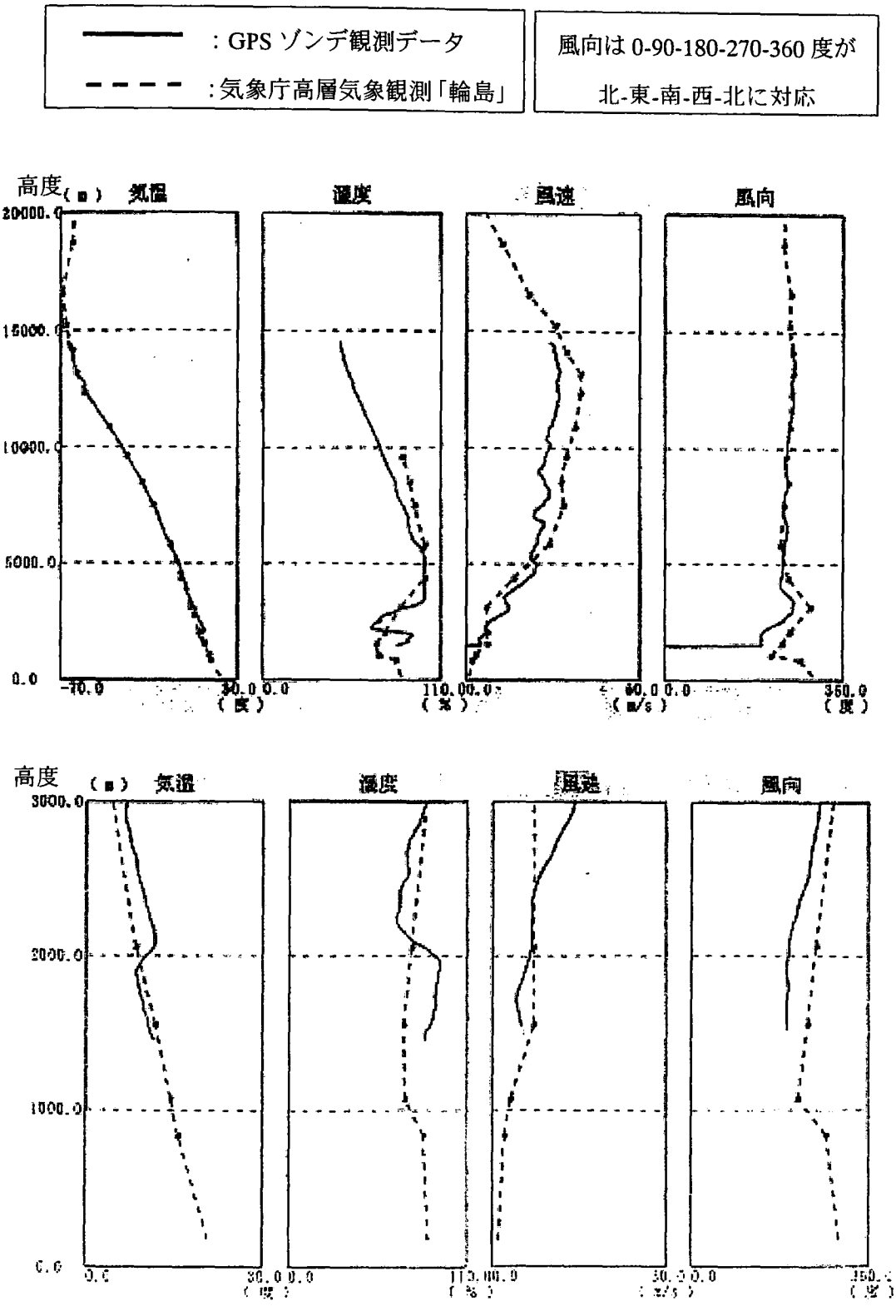


図-2.3.19　GPS ゾンデ観測結果と気象庁高層観測結果（1998 年 9 月 26 日 21 時）

（上段：標高 0-20000m、下段：標高 0-3000m）

２．３．３　梅雨期集中観測

ここでは、表-2.3.1 に示した観測のうち、1999～2001 年の梅雨期に実施した集中観測の結果について述べる。

（１）観測概要

表-2.3.4(a)(b)にドップラーレーダーの観測モードを示す。また、GPS ゾンデ、X-band ミニレーダーの観測データ取得状況一覧は付録３に示す。

表-2.3.4(a)　ドップラーレーダーの観測モード（1999 年）

項目	内容	備考
時間分解能	10 分	所用時間　PPI 観測：約 6 分　RHI 観測：約 2 分
PPI 観測	16 仰角	0.5,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,12,14,16,18,20 度
RHI 観測	2 方位	102.5、282.5 度
観測範囲	60(km)	観測範囲は 64(km)であるが，解析用データは半径 60(km)内

表-2.3.4(b)　ドップラーレーダーの観測モード（2000,2001 年）

項目	内容	備考
時間分解能	10 分	所用時間　PPI 観測：約 7 分
PPI 観測	18 仰角	0.5,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,12,14,16,18,20,25,30 度
観測範囲	60(km)	観測範囲は 64(km)であるが，解析用データは半径 60(km)内

（２）観測結果

1999～2001 年の梅雨期に実施した集中観測の結果について整理を行った結果、多くの事例において、ドップラーレーダー観測によって、黒部峡谷周辺において雨雲が発達・停滞する様子をとらえた。典型的な例として、図-2.3.20 に 2000 年 6 月 23 日 13 時 00 分～13 時 40 分のドップラーレーダーによる東西・鉛直断面図を示す。図から、西風場において黒部峡谷の西側の斜面において、雨雲が発達・停滞する様子がわかる。これらの観測結果から、黒部峡谷周辺においては山岳地形によって水蒸気を多く含んだ大気が強制上昇し冷却され、水蒸気から雨滴へ変化するという地形性の降雨停滞・発達現象が顕著であることを確認した。

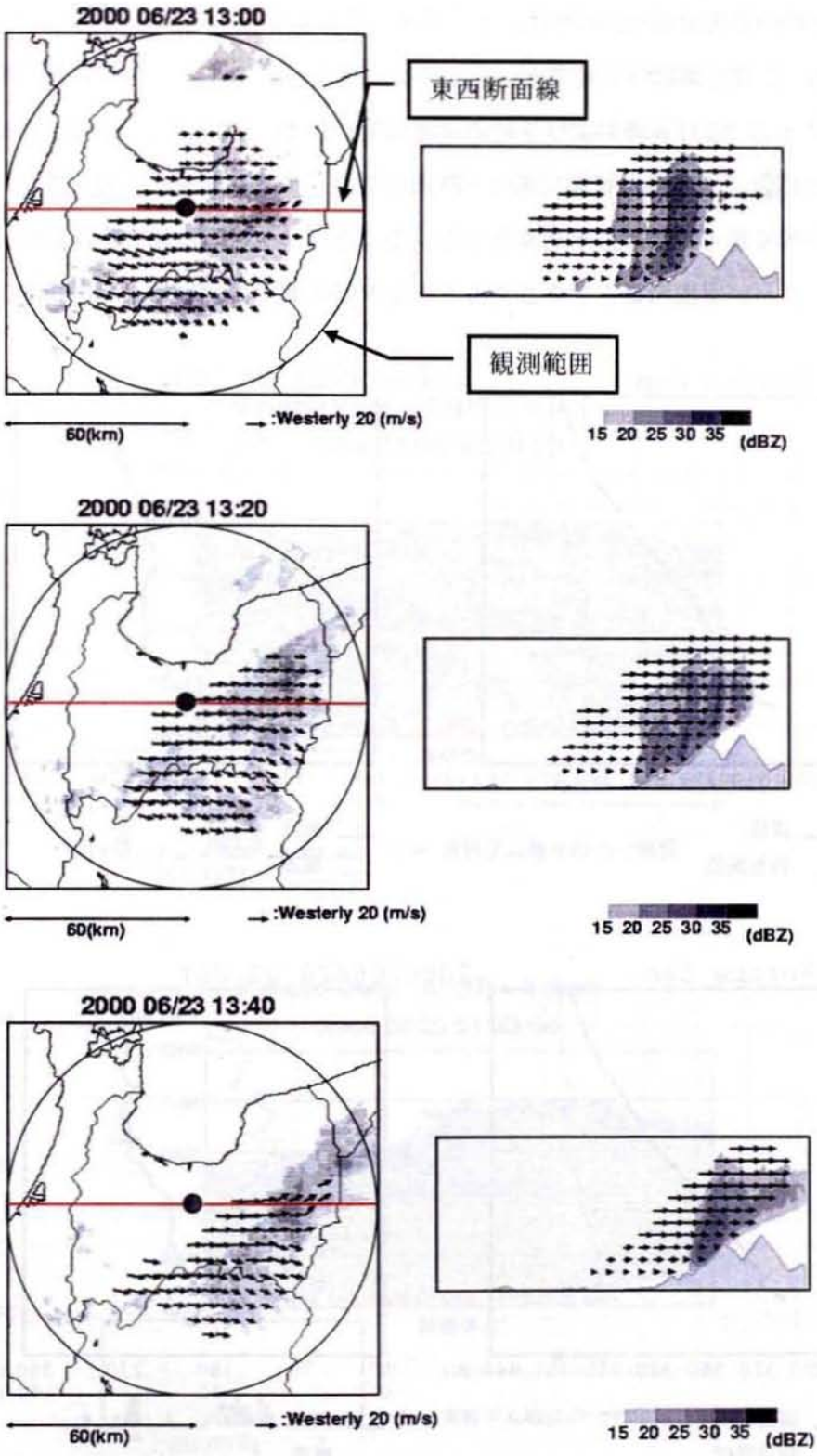


図-2.3.20　レーダー反射強度、風ベクトルの水平分布（3000m 高度）と鉛直断面図
（ドップラーレーダー観測結果（PPI 観測）2000 年 6 月 23 日　13 時 00 分～13 時 40 分）

1999～2001 年の観測では、富山平野と比較すると黒部峡谷周辺で降水量は多かったものの、黒部峡谷内で極端な豪雨は発生しておらず、ミニレーダーおよび GPS ゾンデによる観測データも、これを裏付ける結果となっている。図 2.3.21 に GPS ゾンデ観測の典型例として、2000 年 6 月 28 日 0 時および 3 時の観測結果を示す。同図から、黒部峡谷上空の相当温位は 340(K)以上と暖湿な状態にあり、降雨は発生しやすい状況にあることがわかる。一方、上空に行くほど相当温位が高くなっていることから、大気は鉛直方向に安定な成層状態であり、激しい対流現象を発生させるような大気状態ではないことがわかる。

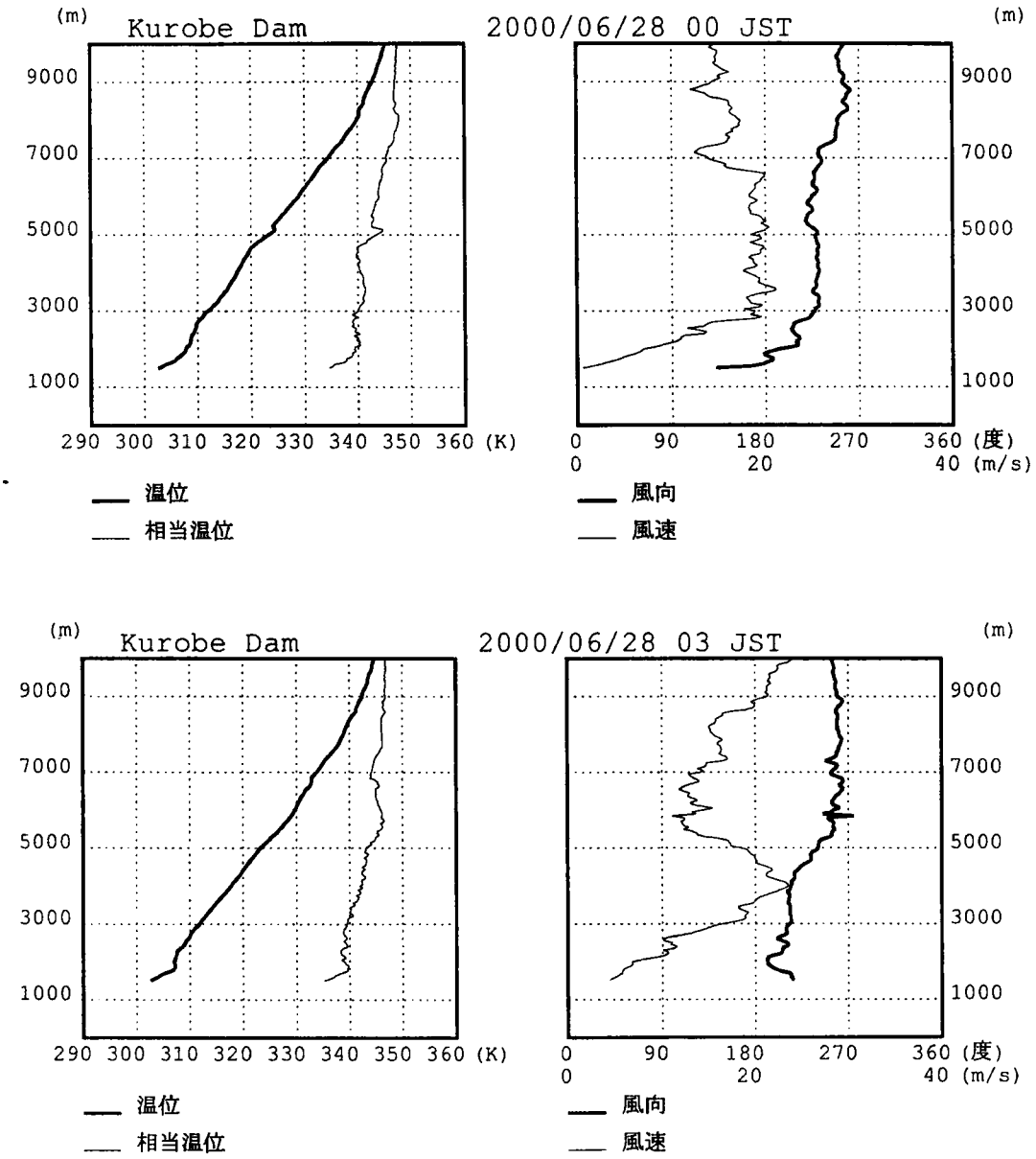


図-2.3.21　GPS ゾンデ観測結果の典型例（2000 年 6 月 28 日　0 時、3 時）

図-2.3.22 に、図-2.3.21 に示した GPS ゾンデ観測の時刻に近い時間帯の黒部ダムサイトにおける X-band ミニレーダーによる観測結果を示す。図から、エコー強度の極大は、高度4,500(m)付近に存在し、7,500(m)より高高度において降雨エコーは観測されていないことがわかる。用いたミニレーダーは X-band を用いているため、降雨減衰によって上空の雨雲をとらえることができていない可能性も考えられるが、GPS ゾンデの観測結果から大気の成層状態は比較的安定であった事実と併せて考えると、観測された降雨事例は層状性の降雨が卓越する降雨事例であったと考えられる。

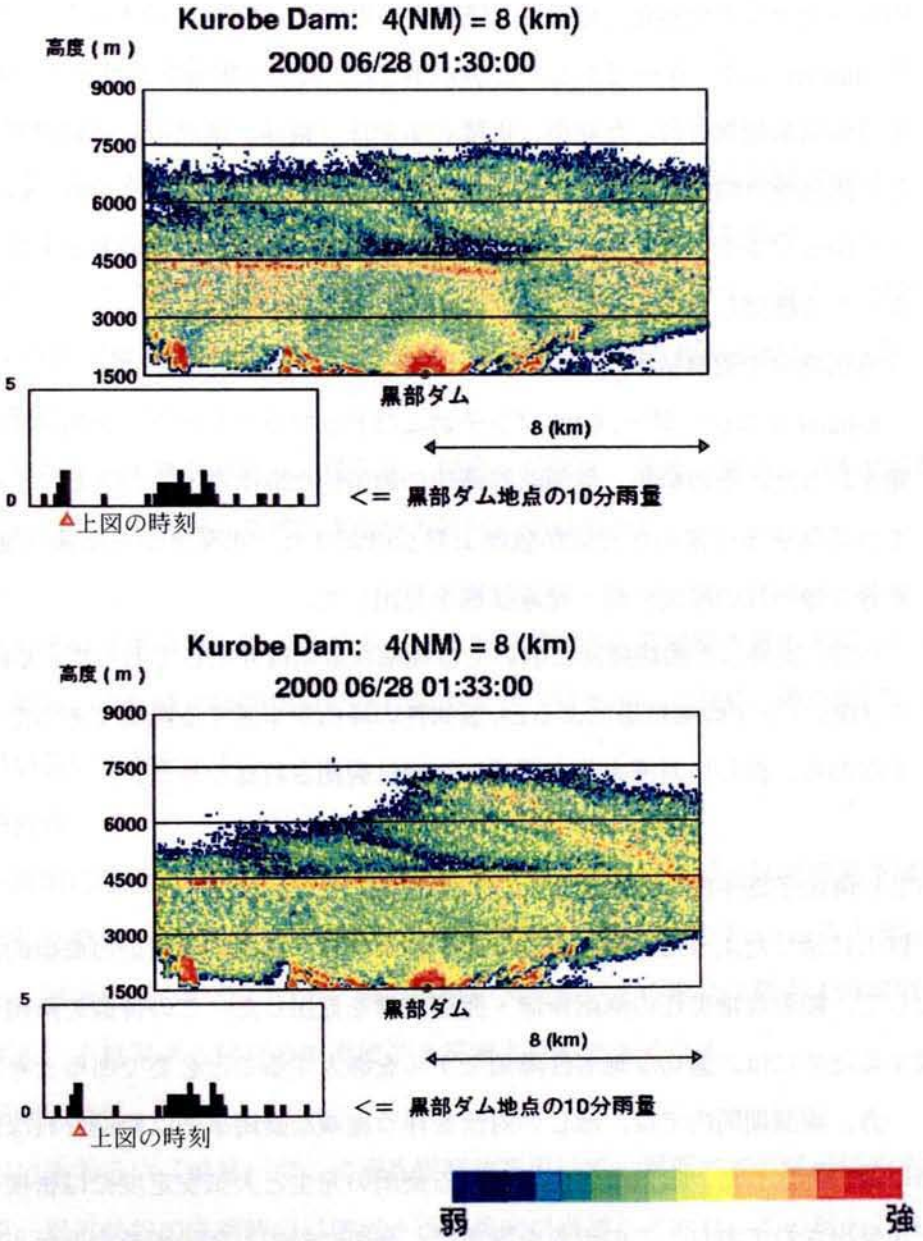


図-2.3.22　X-band ミニレーダー観測結果

２．３．４　観測結果のまとめおよび降雨予測手法への展開

（１）観測結果のまとめ

1998 年から 2001 年と 4 ヵ年にわたって黒部峡谷および周辺地域を対象とした気象・降雨観測を、X-band ミニレーダー、GPS ゾンデおよびドップラーレーダーを用いて実施した。得られた成果は次のとおりである。

①観測手法の有効性

黒部ダムサイトで X-band ミニレーダーにより鉛直断面観測を実施した結果、黒部峡谷内の降雨セルの可視化に成功し、降雨セルの大きさが 1km のオーダーであり、落下速度が 10m/sec のオーダーであることがわかった。同じく黒部ダムサイトで GPS ゾンデによる高層気象観測を行った結果、近隣の気象庁「輪島」地点の高層観測データにはみられない黒部峡谷内固有の気象状況をとらえることができた。このため、X-band ミニレーダー、GPS ゾンデ観測ともに、黒部峡谷の気象・降雨特性を解明する上で有効な手法であることを確認した。

②梅雨期集中観測結果

X-band ミニレーダー、GPS ゾンデおよびドップラーレーダーを用いて梅雨期に集中観測を行った。その結果、黒部峡谷周辺の典型的な降雨パターンとして、山岳地形によって水蒸気を多く含んだ大気が強制上昇し冷却され、水蒸気から雨滴へ変化するという、顕著な地形性の降雨停滞・発達機構を見出した。

一方、実施した観測期間においては極端な豪雨は発生しておらず、X-band ミニレーダー、GPS ゾンデ観測結果によると、層状性の降雨が卓越する降雨であったと考えられる。すなわち、激しい対流を伴う極端な豪雨は観測されなかった。

（２）降雨予測手法への展開

以上に示したように、梅雨期集中観測結果から、黒部峡谷周辺の典型的な降雨パターンとして、顕著な地形性の降雨停滞・発達機構を見出した。この特徴を降雨予測モデルで表現するためには、適切な地形性降雨モデルを導入すること必要であると考える。

一方、観測期間内では、激しい対流を伴う極端な豪雨事例は観測されなかったが、第２節に示したように、黒部峡谷内における豪雨の発生と大気安定度には密接な関係があることが見出されており、この現象を踏まえ、豪雨に対応した降雨予測モデルの開発を行う必要があるものと考える。

２．４　結語

本章では、黒部峡谷および周辺地域の気象・降雨特性を解明すべく、まず第２節で黒部峡谷および周辺地域の 12 ヵ年にわたる地上雨量データの解析を行った。つぎに、第３節では黒部峡谷内を対象として、気象・降雨特性を解明するための観測手法について X-band ミニレーダー、GPS ゾンデ、ドップラーレーダーを用いた、梅雨期の集中観測を実施し、黒部峡谷周辺の気象・降雨特性について詳細に調査した。

本章で得られた結論をまとめると以下のとおりである。

（１）地上雨量データの解析により判明した特性

①全般的な特性

最大 4 時間、最大 24 時間雨量ともに平野部に比べ、山岳域である黒部峡谷付近の降雨量が大きいことがわかる。特に最大 4 時間雨量においてその傾向が顕著である。また、黒部峡谷付近では「立山」、「刈安」の立山稜線～黒部川上流域で、最大 4 時間雨量、最大 24 時間雨量とも極大となる「黒部川上流域降水量極大傾向」が見られる。

②降雨成因別特性

今回抽出した全 204 降雨事例は、低気圧、前線＋低気圧、前線、台風のいずれの降雨成因においても「黒部川上流域降水量極大傾向」が見られる。

③季節別特性

四季のうちでは夏季が最も降雨量が多く、また「黒部川上流域降水量極大傾向」が顕著に見られる。また降水時間数は冬季に最も大きい値を示しており、降雨時間に比べ降雪時間が長いことを示す。

④降雨規模別特性

黒部川中流域に位置する出し平ダム地点の最大 4 時間雨量に基づき降雨規模を層別化して解析した結果、「黒部川上流域降水量極大傾向」は、降雨規模が 15mm 以上 50mm 未満において顕著に見られる。一方、降雨規模が 50mm 以上の場合の最大 4 時間雨量は出し平ダム、小屋平ダム付近の中流域が上流域よりも大きくなる。

⑤高層風の風向別特性

黒部峡谷に最も近い「輪島」での高層風観測値を用いて、黒部峡谷の降雨特性を解析した結果、黒部峡谷の降雨時には南西～西の風向が卓越しており、この風向の時に「黒部川上流域降水量極大傾向」が最も顕著となっている。

⑥大気安定度別特性

黒部峡谷内の各地点はSSIが小さくなる、すなわち大気の状態が不安定になるのにともない、降雨量が大きくなる傾向がある。またSSI<-2の階層、すなわち最も大気の状態が不安定な事例では、「立山」地点ではその他の事例と差がないが、黒部峡谷内の最上流の「刈安」地点から下流域にかけてはその他事例に比べ大きな降雨量を示しており、特に中流域の「仙人谷ダム」「小屋平ダム」「出し平ダム」地点においてこの傾向は顕著である。このことは、上空の大気安定度と黒部川中下流部の降雨現象に密接な関係があり、大気の状態が不安定であると「黒部川上流域降水量極大傾向」は見られず、むしろ黒部川中下流域に大雨をもたらす可能性があることを示唆している。

⑦豪雨事例の特性

出し平ダム地点での最大4時間雨量が90mmを越える豪雨事例5事例を対象として解析を行った結果、前線に起因する降雨で、輪島でのSSIの最小値が-2(K)未満と極めて大気の状態が不安定、さらに輪島の高層風向は西風系の場合、黒部川中下流域で豪雨となっていることがわかった。

（２）梅雨期集中観測から得られた知見

①観測手法の有効性

1998年の予備観測によって、ミニレーダー、GPSゾンデが黒部峡谷内の降雨・気象特性を把握するための有効な手段であることがわかった。

②黒部峡谷周辺の降雨発達特性

1999年～2001年に実施したドップラーレーダー観測から、黒部峡谷周辺の風系と降雨分布の間に明確な関係があること、黒部峡谷周辺の典型的な降雨パターンとして、山岳地形によって水蒸気を多く含んだ大気が強制上昇し冷却され、水蒸気から雨滴へ変化するという、顕著な地形性の降雨停滞・発達機構を見出した。

（３）降雨予測手法への展開

①黒部峡谷の典型的な降雨パターンとして顕著な地形性の降雨停滞・発達機構が見出されたため、これを表現しうる適切な地形性降雨モデルを導入することが必要である。

②黒部峡谷における豪雨の発生と大気安定度には密接な関係があることが見出されており、この現象を踏まえた豪雨に対応する降雨予測モデルの開発を行うことが必要である。

第２章　参考文献

1) 例えば、日本気象学会：気象科学事典，東京書籍，pp.26, 259，1998.

2) 立平良三，鈴木修：単一ドップラーレーダーによる上層風推定の精度，天気，Vol.41，No.11，pp.23-36，1994.

第３章　急峻な山岳域における降雨量の予測技術に関する研究

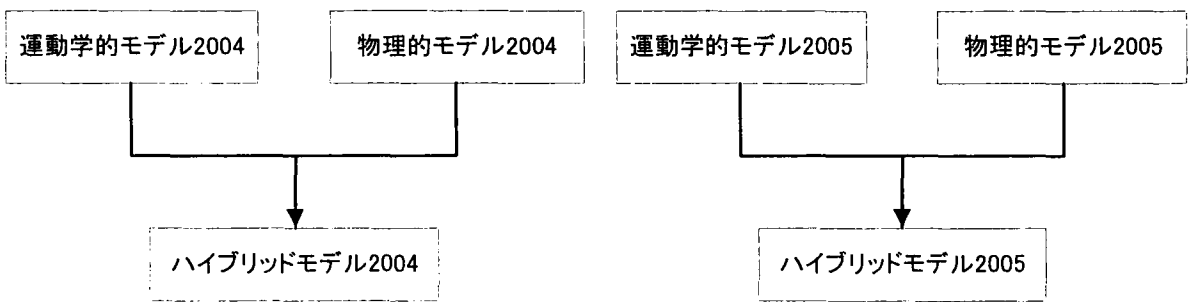
３．１　概説

本章は、急峻な山岳域における降雨予測手法の開発とその高度化について論じるものである。

第２節では、本研究で開発した降雨予測手法のベースとなる手法について述べる。まず各種の降雨予測手法について整理した後、運動学的手法に第２章で見出された黒部峡谷の降雨特性を反映したモデルと、さらに物理的手法を合成（ハイブリッド）させることにより６時間先までの降雨予測を高精度で行うために開発した手法についてその精度検証も含めて述べる。第２節で述べるモデルを、便宜的にハイブリッドモデル 2004 と称し、ハイブリッドモデル 2004 を構成する運動学的手法に基づいたモデルを運動学的モデル 2004、物理的手法に基づいたモデルを物理的モデル 2004 と呼ぶことにする。

つぎに第３節では、第２節で述べた手法に最新の技術を適用して高度化を行った結果について述べる。降雨予測に関する最新の技術としてまず、可降水量データを、つぎに気象庁配信の最新データである MSM データ、ウインドプロファイラ、1km メッシュ合成レーダーデータを取り上げ、これらを活用して予測精度を向上させる手法について述べ、その効果の検証を行う。本節で述べるモデルを、前節のモデルと同様にそれぞれ、ハイブリッドモデル 2005、運動学的モデル 2005、物理的モデル 2005 と称する。

図-3.1.1 に本研究における降雨予測モデルの構成を示す。



(a)　第２節で述べるモデル　　(b)　第３節で述べるモデル

図-3.1.1　本研究で開発した降雨予測モデルの構成

３．２　急峻な山岳域における降雨予測手法の開発

３．２．１　既往の降雨予測手法の概要

（１）運動学的手法による降雨予測

レーダーや気象衛星情報から降雨強度を推定し、降雨強度分布の時間変動パターンを時間的に外挿する手法は一般に運動学的手法とよばれ実用化されている。手法としては以下のようなものがある。

・上層風によってそのまま降水強度分布を移流させるもの[1)]。

・各降雨域の重心の移動速度によって補外するもの[2)]。

・時間の異なる２枚の強度分布から相互相関関数[3)]や関連係数[4)]、重み付き相関係数が最大となる移流ベクトルを推定して補外するもの[5)]。

・変形テンソル[6)]や移流モデル[1),7),8)]、拡散移流モデル[9),10)]など二次元流体の解析手法を用いて移流ベクトルや発達・衰弱量を推算して補外するもの。

・その他、確率密度関数[11)]や荷重関数[12)]を降雨分布に当てはめるもの、ニューラルネットワークを用いるもの[13)]等。

レーダーデータを用いるこれらの多くの短時間降雨予測手法はこの運動学的手法に分類され、実用上確実に利用できるのは流域スケールで１時間先予測まで[14)]、都市域スケールでは30分予測まで[10)]とされている。これらの手法のうち、最も一般的なものとして移流モデルが挙げられる。

（２）物理的手法による降雨予測

物理的手法による予測とは、気象衛星や地球規模での観測網からの膨大なデータに基づいて、気圧、水蒸気、気温といった大気物理量の保存則を時間積分するなど、文字どおり大気の状況を物理量の数値によって表現し、その数値の変化を物理法則に基づいて計算し、予測する手法である。図-3.2.1に物理モデルで扱う物理過程の概念図を示す。

（３）降水モデルによる降雨予測

このモデルは、三次元レーダーを用いた短時間降雨予測モデル[16)~20)]である。三次元レーダー情報および不安定場概念を用いた降雨予測の概要について以下に述べる。

三次元レーダーとは、降水を立体的に観測するために複数のビーム仰角でもって走査す

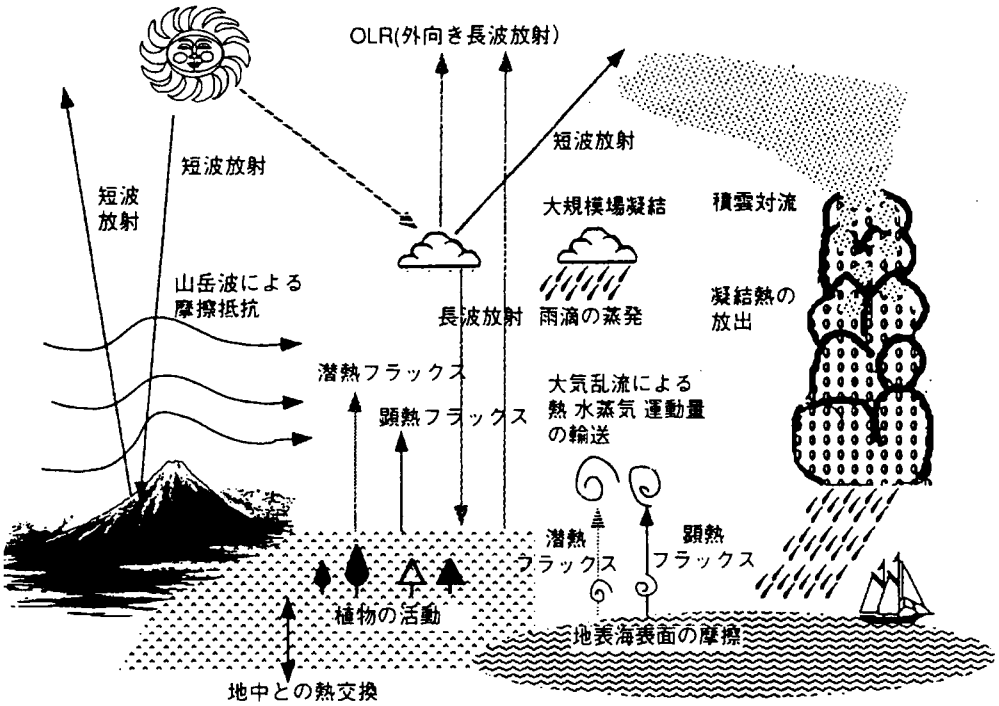


図-3.2.1　物理モデルで扱う物理過程（概念図）[15)]

るレーダーのことをいう。この予測手法は、地形の影響を強く受けている降雨分布を、運動学的手法の限界を超えて3～4時間先までの予測を可能とするために開発されたもので、予測手法と同時に提案された降雨の概念モデル（不安定場モデル）に基づいている。降水をもたらす不安定場は、レーダー観測域を通過する間は変化せず、地形との相互作用によって、降水へのインプットとなる水蒸気から水分への変化効率を高めるものとする。レーダーは地形との相互作用の結果生じる降雨を観測している。そのため、降雨場をそのまま移動させてもうまく予測されない。地形の影響を取り除くことができれば、すなわち観測情報から不安定場が推定できれば、それは安定した構造をしているので、その移動の予測も容易であろう。基本的には、このような考え方をもとに予測手法が構成されている。まず、三次元風速場を求め、予測計算の間その風速場を固定する。そのうえで、三次元レーダー情報から単位体積単位時間当たりの水蒸気相変化量の三次元分布を推定する。この分布は地形の影響を受けている。この分布から、不安定場のパラメーターを推定する。この不安定場のパラメーター分布の過去の動きを外挿して将来の不安定場を予測し、その予測分布から水蒸気の相変化量の三次元分布を予測し、さらに降雨強度分布を予測する。

３．２．２　ハイブリッド降雨予測手法の開発[21)]

（１）開発の必要性

多くのダムが位置する急峻で複雑な山岳域では、海上や平野部から移流してきた雨域が山岳域特有の地形特性を受けて発達し、豪雨をもたらす場合がある。ダムを適切に管理・運用するには、豪雨の状況を的確に把握することに加えて、山岳域特有の降雨現象を捉えて、より精度の高い降雨予測値を得ることが非常に重要となる。

これまでダム流域を対象とした降雨予測手法としては、主に 1～2 時間先の予測を対象に開発されてきた。例えば、豪雨をもたらす積乱雲のライフスケールが数時間程度であることに着目し、気象庁のレーダー情報を地上雨量計で補正するなどにより、現在までの雨域の移動と変形・発達を幾何学的に解析する運動学的予測モデルによる手法[22)]が開発されている。

一方、数時間～2 日程度先までの降雨予測については、気象庁によって、物理的モデルを用いた手法による予測値の配信が行われている。これは、気象衛星や地球規模での観測網からの膨大なデータに基づいて、気圧、水蒸気、気温といった大気物理量の保存則を時間積分するなどして予測値を算出し配信するものである[23)]。しかしながら、ダム管理の実務における利用を目的とする場合、ダムの多くが位置する山岳域における予測精度や配信間隔などの面から、十分なものとはいい難い。

特に、急峻な山岳域に位置するダムの豪雨に対する防災力を向上させるには 4～6 時間先までの降雨予測が要求されるが、上述の運動学的予測と物理的予測の谷間となるこの時間帯は、Doswell[24)]が指摘する「予測の谷間」（図-3.2.2 参照）とされており、運動学的手法による単純な雨域の移動・変形では数時間先の雨域の発達や衰弱が予測できないこと、および物理的手法では雨に関する観測値をモデルに取り込むことが困難で、時々刻々変化する山岳域の降雨現象への対応が困難であるため、予測精度が低下することとなる。

そのため本研究では、黒部峡谷内および周辺の降雨特性[25)]を踏まえつつ、運動学的手法と物理的手法を合成（ハイブリッド）させることにより、6 時間先までの予測を行う、高精度な降雨予測手法を開発した[26), 27), 28)]。

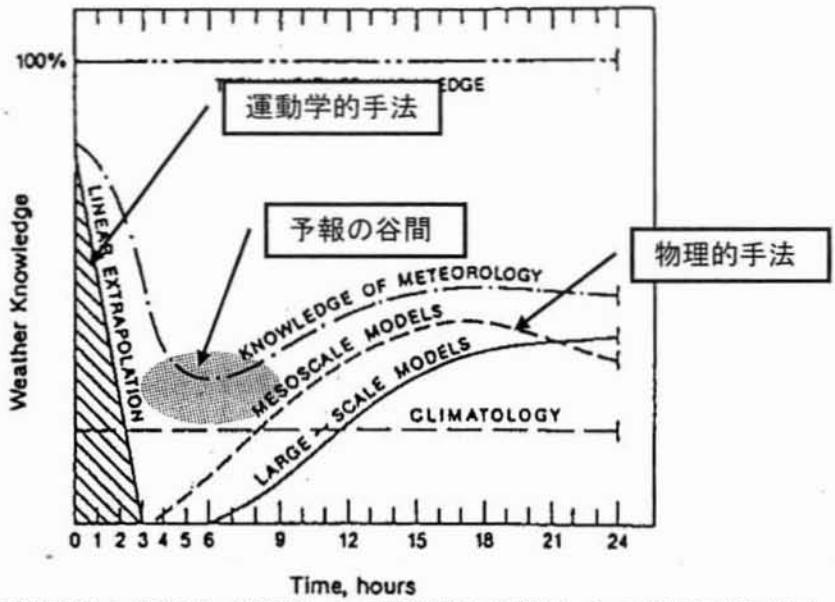


図-3.2.2　予測手法の有効性（縦軸）と予測時間（横軸）との関係の模式図
（Doswell[24]に加筆）

（２）運動学的手法による降雨予測モデルの構築

第２章において黒部峡谷およびその周辺地域を対象として地上雨量データおよびドップラーレーダー、X-band ミニレーダー、GPS ゾンデ等を用いた観測により黒部峡谷の降雨特性に関する種々の現象を解明した。また、黒部峡谷の降雨を支配する大きな要因のひとつとして、ドップラーレーダー観測結果として示したとおり、立山西側の斜面において地形性降雨が停滞・発達する現象であることを述べた。

また、過去 12 年間の地上雨量データ、気象庁の高層気象データを用いた解析から、高層気象観測点「輪島」の高層気象データから算出した大気の安定度を示す SSI が、-2(K)未満と黒部峡谷周辺の大気の状態が非常に不安定な状況である場合に、黒部峡谷で豪雨となる傾向にあることを示した。

ここでは、これら黒部峡谷周辺の降雨特性を踏まえて、運動学的手法による降雨予測モデルを構築した結果について述べる。図-3.2.3 に黒部峡谷周辺を対象とした運動学的手による降雨予測モデルの概念図を示す。

本研究における運動学的予測モデルは、レーダー雨量データを用いた移流モデル[7]を基礎とするものである。移流モデルでは、式(3.2.1)、式(3.2.2)で表現されるように移動ベクトル（u,v）で雨域の移動、w で雨域の発達・衰弱を考慮し、将来の降雨強度を予測することができる。パラメータ $c_i(i=1,\cdots,9)$ は、過去から現在までの各メッシュの降雨強度にもとづき、式(3.2.4)、式(3.2.5)で定義される J_c が最小になるように最小二乗法によって同定

される。本研究では、第２章で見出した黒部峡谷周辺における降雨特性を明示的に組み込むために、移流モデルでは雨域の水平移動のみを同定し、雨域の発達・停滞・発生については、立平の地形性降雨モデル[29]（以下「立平モデル」）および GPV データを利用した降雨発生・発達モデルで表現することとした。したがって、パラメーター $c_i(i=1,\cdots,9)$ において、c_3, c_6 以外は 0 とした。

$$\frac{\partial r}{\partial t}+u\frac{\partial r}{\partial x}+v\frac{\partial r}{\partial y}=w \tag{3.2.1}$$

$$\begin{pmatrix} u_{ij} \\ v_{ij} \\ w_{ij} \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \\ c_4 & c_5 & c_6 \\ c_7 & c_8 & c_9 \end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix} x_i \\ y_j \\ 1 \end{pmatrix} \tag{3.2.2}$$

$$\begin{cases} x_i=\left(i-\dfrac{1}{2}\right)\cdot\Delta x, & i=1,\cdots,M \\ y_j=\left(j-\dfrac{1}{2}\right)\cdot\Delta y, & j=1,\cdots,N \\ t_k=k\cdot\Delta t, & k=1,\cdots,K-1 \end{cases} \tag{3.2.3}$$

$$\nu_{ijk}=\left[\frac{\partial r}{\partial t}\right]_{ijk}+u_{ij}\cdot\left[\frac{\partial r}{\partial x}\right]_{ijk}+v_{ij}\cdot\left[\frac{\partial r}{\partial y}\right]_{ijk}-w_{ij} \tag{3.2.4}$$

$$J_C=\sum_{k=-K}^{-1}\sum_{i=2}^{M-1}\sum_{j=2}^{N-1}\nu_{ijk}^2 \tag{3.2.5}$$

ここに

$r(x,y,t)$ ：地点（x、y）、時刻 t での降雨強度

u,v ：雨域の移動ベクトル

w ：雨域の移動に伴う発達・衰弱量

M ：東西方向の格子数

N ：南北方向の格子数

Δx ：東西格子間隔　Δy ：南北格子間隔

K ：パラメーター同定に用いる過去データの数

Δt ：パラメーター同定に用いるデータの時間間隔

ν_{ijk} ：パラメーター推定誤差

$[\ ]_{ijk}$ ：点（x_i, y_j）、時刻 t_k での降雨強度 r の偏微分の差分近似

予測計算領域は、図-3.2.4 に示す気象庁西部東海合成レーダーの領域（500km×500km）

とし、水平分解能 2.5km メッシュで 6 時間先までの予測雨量を計算する。また、$\Delta x = \Delta y = 2.5\text{km}$、$M = N = 200$、$\Delta t = 10$ 分、$K = 3$ とした。

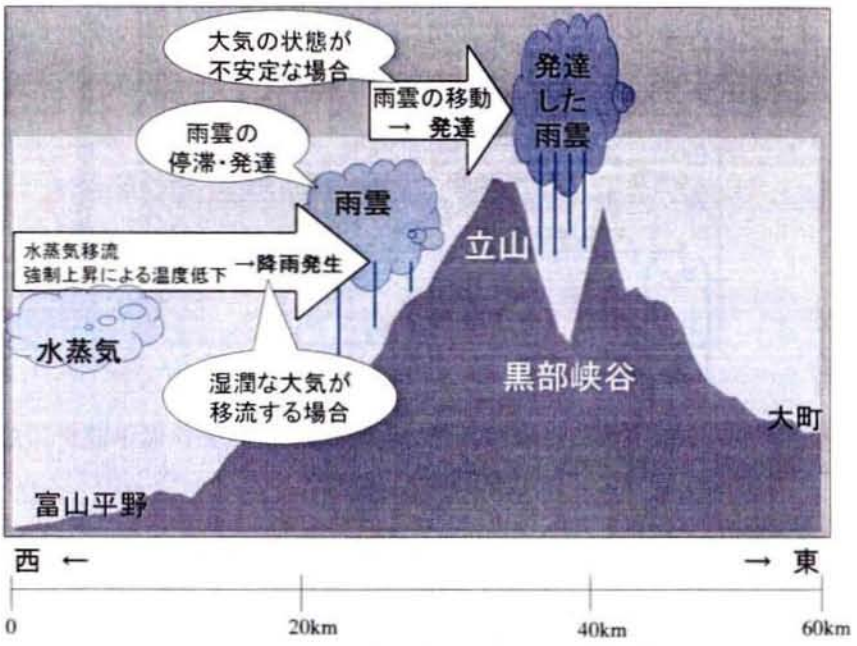


図-3.2.3　運動学的降雨予測モデルの概念図

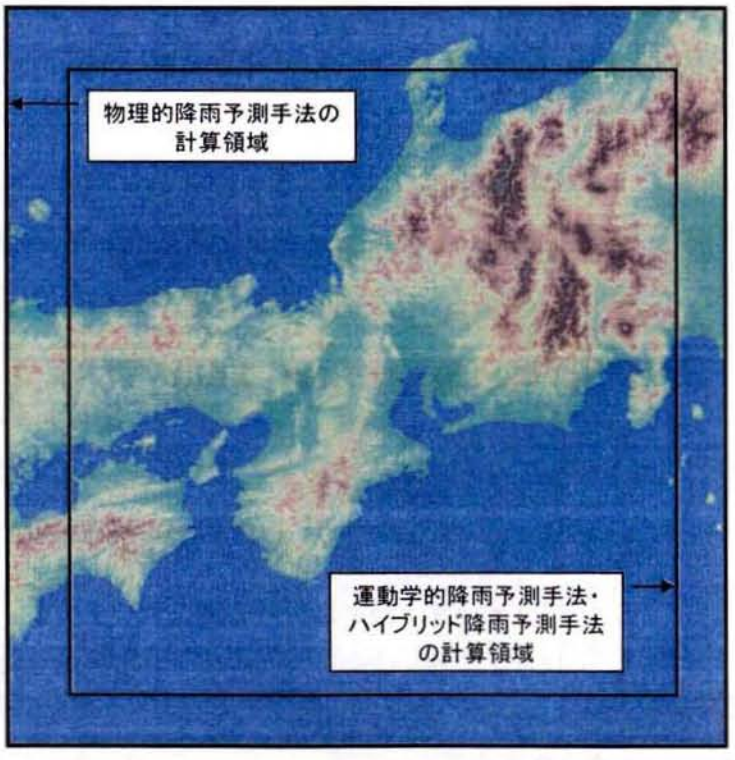


図-3.2.4　ハイブリッド降雨予測モデルの計算領域

本運動学的予測モデルの特徴として、地形と関係しない気象擾乱に伴う降水粒子（非地形性降雨）が地形による強制上昇によって生じた雲粒を補足して地形性降雨を生成する機構（立平モデル）を組み込んでいる点がある。雨域を地形性降雨と非地形性降雨に分離することで，黒部峡谷周辺で発達・停滞する雨域を表現している。すなわち，運動学的予測モデルにおいて，地形性降雨を停滞成分として取り扱うことで黒部峡谷周辺の降雨現象を精度良く予測できる。さらに、これに加えて，気象擾乱に伴う降水粒子があらかじめ存在しない場合においても，水蒸気が地形による強制上昇によって雨粒が新たに形成される過程や，大気の成層状態が不安定な場合に雨雲が急激に発達する過程を表現するために，GPV(Grid Point Value)データを利用した降雨発生・発達モデルを導入した[21]。

予測計算のフローを図-3.2.5 に示し、手順の詳細を以下に説明する。また、予測雨量作成の模式図を図-3.2.6 に示す。

①レーダー雨量のキャリブレーション

レーダー雨量データを地上雨量によってキャリブレーションし、補正レーダー雨量を算出する（図-3.2.7 参照）。

②移動ベクトルの算出

予測開始時刻の 30 分前から予測開始時刻までの連続する 10 分毎の 4 時刻の補正レーダー雨量を用いて、計算領域全体の雨域の移動方向と速度（以下「移動ベクトル」）を算出する。この計算には、移流モデル[7]を適用する。

③立平モデルによる地形性降雨テーブルの入力

16 方位の風向別にあらかじめ非地形性降雨が 4mm/hour、風速 10m/sec という条件で、メッシュ毎に立平モデルによる地形性降雨を計算しておく。

④地形性降雨と非地形性降雨の分離

②で求めた移動ベクトルが場の風向、風速を代表しているとみなした上で、地形性降雨の強度が、風速と非地形性降雨の強度に比例すると仮定し、補正レーダー雨量を地形性降雨（停滞成分）と非地形性降雨（移動成分）とに分離する。

⑤非地形性降雨の移動ベクトル場による移動

非地形性降雨の強度に、後述する GPV データから算出する降雨発達係数を乗じ、②で求めた移動ベクトルによって移流させ、1 時間後の予測値を計算する。

⑥予測雨量の計算

⑤で得られた移動後の非地形性降雨域の予測値に、地形性降雨量と後述する GPV データから算出される降雨発生量を重ね合わせて、1 時間後の予測雨量を得る。以後 6 時間先まで、④～⑥を繰り返す。

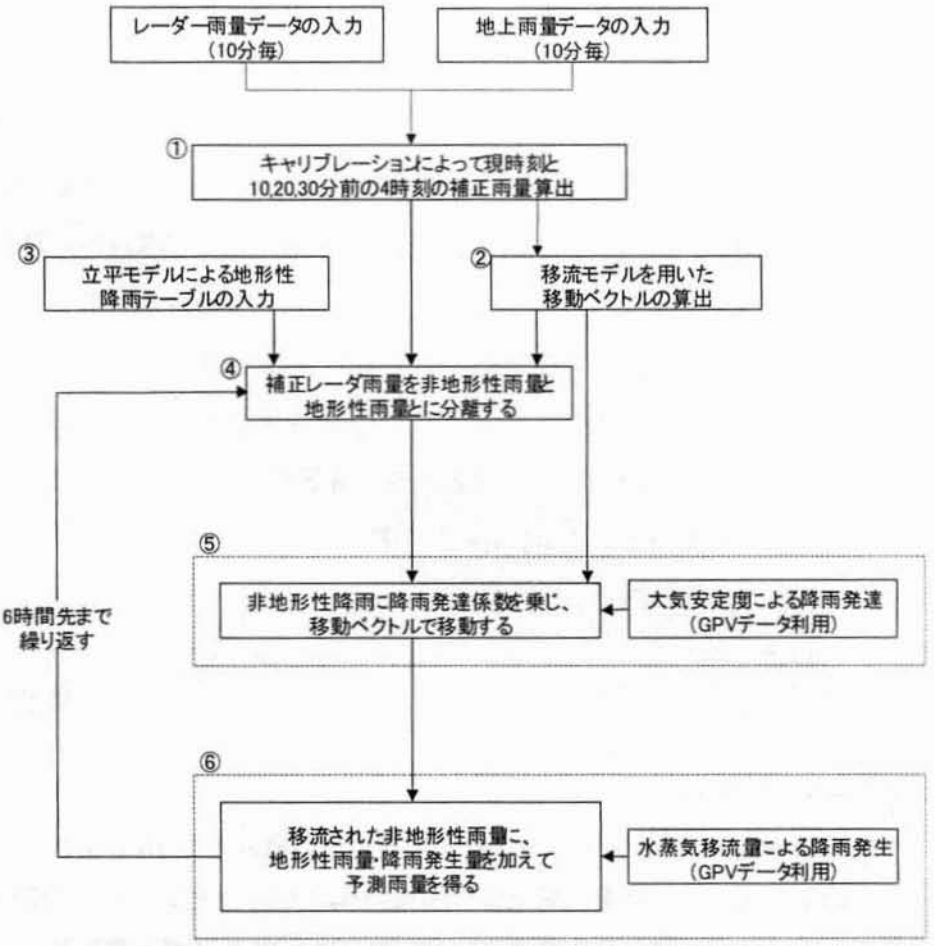


図-3.2.5　運動学的モデルによる予測計算のフロー

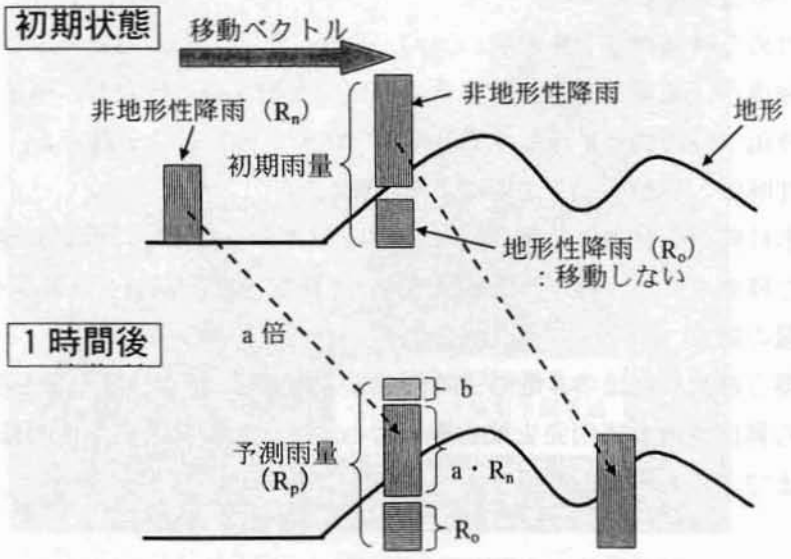


図-3.2.6　予測雨量作成の模式図

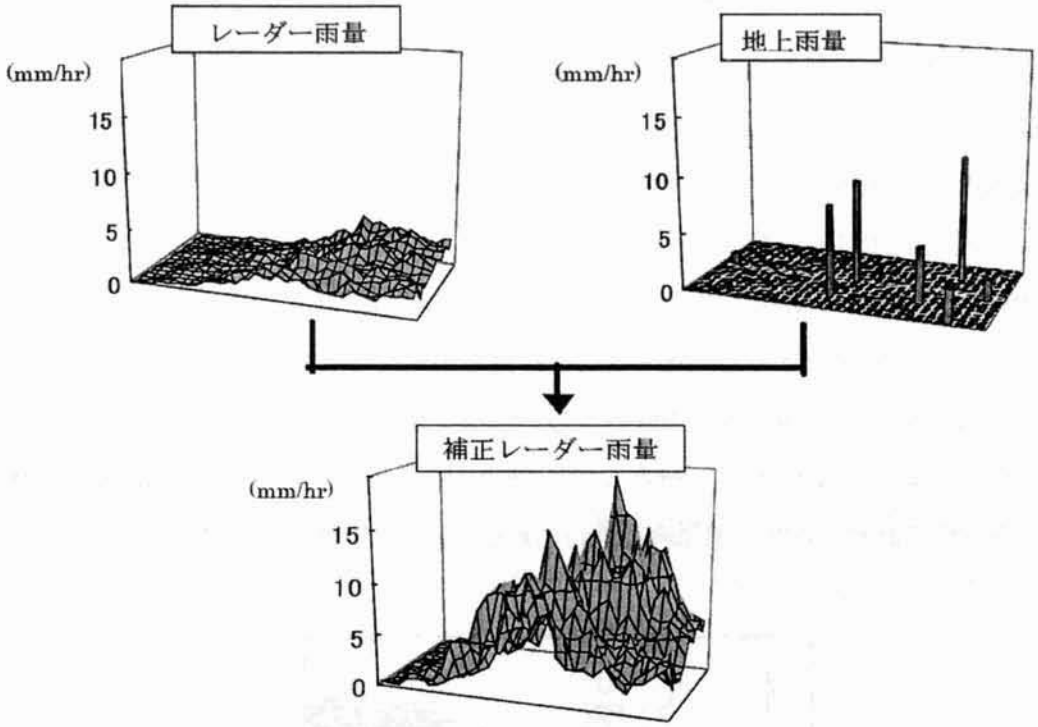


図-3.2.7　キャリブレーションの概念図

すなわち、該当メッシュにおける④の地形性降雨の強度を R_o (mm/hour)、移動前の非地形性降雨の強度を R_n (mm/hour)、⑤における降雨発達係数をa、⑥における降雨発生量をb (mm/hour)とすると、該当メッシュにおける予測雨量 R_p は、次式のように表現できる。

$$R_p = a \cdot R_n + R_o + b \tag{3.2.6}$$

以下では、黒部峡谷の気象・降雨特性を反映するために導入した、①地形性降雨モデル②GPV データを利用した降雨発生モデル、③GPV データを利用した降雨発達モデル、の各モデルについて詳述する。

①地形性降雨モデル

地形性降雨モデルには、立平モデル[29]を用いた。立平モデルは、以下の２点を主な特徴とした地形性降雨計算法である。

・地形と関係ない気象擾乱に伴う降水粒子（非地形性降雨）が、地形による強制上昇によって生じた雲粒を補足して地形性降雨を生成する機構を組み込んでいる。

・気塊の履歴を考慮し、降水として落下した水蒸気量を、気塊から逐次とり除く操作を行っている。

立平モデルでは、700、800、900hPa の各高度における風向、風速、水蒸気量および非地

形性降雨強度を入力値として、地形性降雨を計算する。本研究では、以下の条件で風向 16 方位について地形性降雨を計算した。

・非地形性降雨を、全計算領域において一様とする。

・700hPa、800hPa、900hPa 高度ともに、風向・風速は一定とする。

・水蒸気量は、全層で飽和状態とする。

・気塊は山を迂回せずに上昇する。

ここで仮定した条件は、必ずしも一般的に成立するものではないが、飽和状態と仮定し、気塊が山を迂回せずに上昇すると仮定することは最も地形性降雨が発生しやすい条件となっており、地形性降雨が卓越する黒部峡谷周辺の降雨特性を表現できていると考える。

立平モデルによる計算結果の一例として、図-3.2.8 に西風 10m/sec、非地形性降雨 4mm/hour の条件で計算された、黒部峡谷周辺の地形性降雨の分布図を示す。

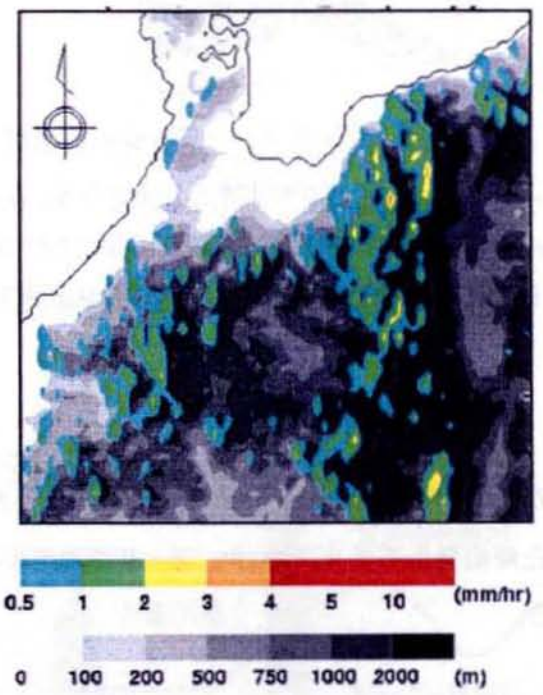


図-3.2.8　立平モデルによる地形性降雨分布

（西風 10m/sec、非地形性降雨 4mm/hour の場合）

予測計算における補正レーダー雨量から地形性降雨と非地形性降雨への分離方法は以下のとおりである。レーダー補正雨量を R、地形性降雨を R_O、非地形性降雨を R_N とすると、

$$R = R_O + R_N \tag{3.2.7}$$

である。地形性降雨の強度は、風速と非地形性降雨の強度によって変化するが、本研究では、簡単のために、地形性降雨と非地形性降雨、地形性降雨と風速の間にそれぞれ線形関係が成り立つと仮定した。この仮定のもとで、風速 10m/sec、非地形性降雨 4mm/hour という条件で求めた地形性降雨を R_g とし、移動ベクトルの速度 V m/sec で風速値を代用すると、

$$R_O = \frac{R_g \cdot R_N}{4} \cdot \frac{V}{10} \tag{3.2.8}$$

となる。式(3.2.7)、式(3.2.8)から、

$$R_N = R \cdot \left(1 + \frac{R_g \cdot V}{40} \right)^{-1} \tag{3.2.9}$$

により、非地形性降雨と地形性降雨を分離した。

なお，基準となる地形性降雨の算出に用いた風速 10m/sec および非地形性降雨 4mm/hour という条件は，地上付近における風速の代表的なスケールおよび立平[29]の計算条件を参考に設定したものである。

②GPV データを利用した降雨発生モデル

移流モデルでは、予測初期時刻において計算対象領域に雨域が存在しない場合や、雨域が該当領域から非常に離れた領域にしか存在しない場合、予測雨量はゼロとなる。しかし水蒸気が多く存在する場合には、黒部峡谷および周辺においては山岳地形によって水蒸気が強制上昇し、降雨が発生するプロセスが存在する。このプロセスのモデル化は降雨開始時点の精度向上を目指すものであり、以下に示すようにモデル化した。

まず、上空 1,500～3,000m 付近の高度における水蒸気移流量が多いほど、また、水蒸気の移流方向の斜面が急な地形であるほど、水蒸気から降水量への変換量は多いと考えられる。さらに黒部峡谷周辺を予測対象領域として見た場合、第２章に示したとおり、西風の場合にこの降雨発生プロセスが卓越することから、移動ベクトルの角度が 270±30°（270°が西風に相当）であり、黒部峡谷周辺の GPV （RSM）の 2 メッシュのいずれかにおいて 700hPa 高度の水蒸気移流量が 150(g/kg・m/s)を超えた場合、図 3.2.9 に示した領域全体の各メッシュにおいて、式(3.2.6)の降雨発生量 b を式（3.2.10）および式(3.2.11)によって算出することとした。

$$b = R_{pot} \times R_{og} / R_{ogmax} \tag{3.2.10}$$

$$R_{pot} = \min \{0.04 \times (V_{adv} - 150), 10.0\} \tag{3.2.11}$$

ここに、

R_{pot}　：黒部峡谷内の降雨発生量の最大値 (mm/hour)

V_{adv}　：700hPa 高度の水蒸気移流量 (g/kg・m/s)

R_{og}　：各メッシュにおける、立平モデルによる地形性降雨の強度 (mm/hour)

R_{ogmax}　：降雨発生想定領域内の立平モデルによる最大地形性降雨量 (mm/hour)

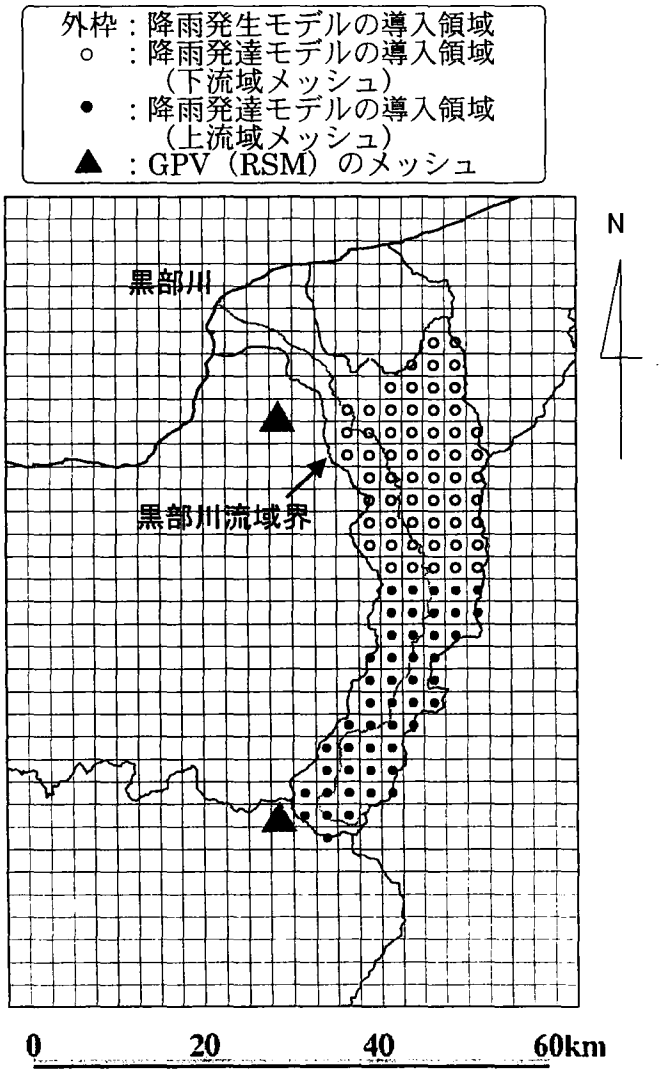


図-3.2.9　黒部峡谷周辺のモデルメッシュ

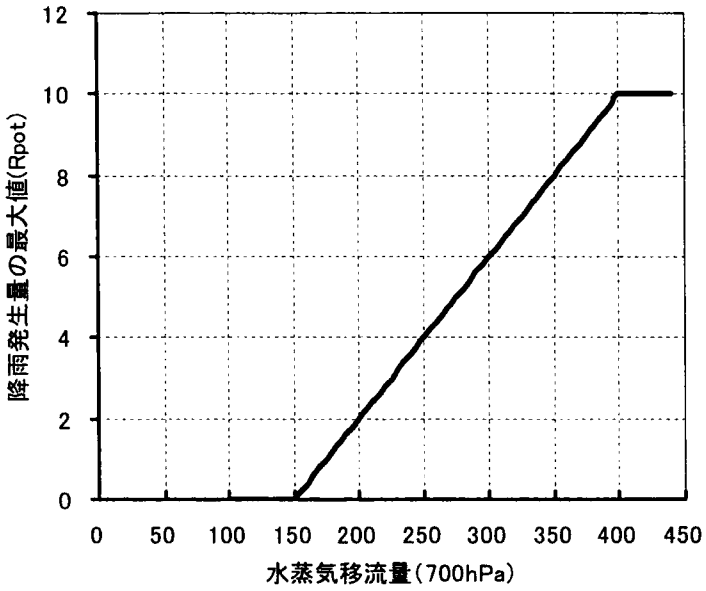


図-3.2.10　降雨発生量の最大値の設定

式(3.2.11)の関係を図示すると図-3.2.10 のようになる。また、予測開始時点において降雨が観測されている場合には、別途、立平モデルによって地形に起因する水蒸気から降水量への変換プロセスをモデル化しているため、過大予測とならないよう該当メッシュにおいて既に地形性降雨が 2mm/hour 以上発生している場合には、降雨発生量 b＝0 (mm/hour)とすることとした。これらは、式(3.2.11)に含まれる定数、水蒸気移流量の計算に用いる GPV の高度（700hPa 高度と 850hPa 高度）、閾値を種々組み合わせて試行計算を行い、黒部川流域内の降雨時系列や、黒部峡谷および周辺降雨分布の予測結果が実測結果に整合するように設定したものである。

③GPV データを利用した降雨発達モデル

第２章において、「輪島」の高層気象データから算出した SSI を用いた解析により、黒部峡谷周辺の大気の状態が不安定な場合に、黒部峡谷内において豪雨が発生する傾向にあることを見出した。

この現象を反映するため以下のように降雨発達のモデル化を行った。

黒部峡谷内を、図-3.2.9 の黒丸および白丸に示すように上流域と下流域に分割し、最近傍の GPV（RSM）メッシュにおける 700hPa 高度と 500hPa 高度の相当温位を、それぞれ、$\theta_e(700)$、$\theta_e(500)$とする。この$\theta_e(700)$、$\theta_e(500)$を用いて、式（3.2.6）の降雨発達係数 a

を、式（3.2.12）で算出することとした。図 3.2.11 に式（3.2.12）で計算される相当温位差と降雨発達係数の関係を示す。この関係も式(3.2.12)に含まれる定数と用いる GPV の高度を種々組み合わせて試行計算を行い、黒部川流域内の降雨時系列や降雨分布の予測結果が実測結果に整合するように設定したものである。

$$a = \max\{10^{0.01\times\{\theta e(700)-\theta e(500)\}}, 1\} \qquad (3.2.12)$$

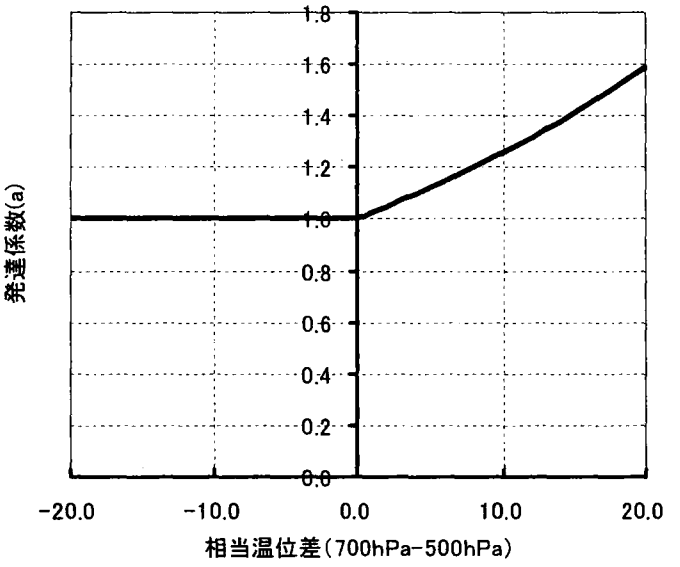


図-3.2.11　降雨発達係数の設定

以上により構築した運動学的モデル 2004 を用いて、第 2 章でドップラーレーダー観測データを解析した 2000 年 6 月 23 日の事例を対象として、6 時間先までの予測計算を行った結果について述べる。比較のため、地形性降雨を考慮せずに移動ベクトルによって雨域を移動させる単純移流モデルによる予測計算も行った。

6 月 23 日 12 時を予測初期時刻とした各手法による予測雨量分布と実況雨量分布の比較を図-3.2.12 に示す。同図より、単純移流に比べ、地形性降雨を考慮した運動学的モデル 2004 は、立山周辺の地形特性によって降雨域が停滞する様子が特に 3 時間先予測までは良く再現できていることがわかる。また、黒部ダム地点における予測雨量と実況雨量の時系列を図-3.2.13 に示す。運動学的モデル 2004 では、降雨開始時点での予測雨量を過小に評価する傾向があるが概ね良好な予測結果となっている。

以上のように、黒部峡谷周辺における降雨特性を踏まえたモデルとすることで、単純移流にくらべ大幅に予測精度が改善することがわかる。

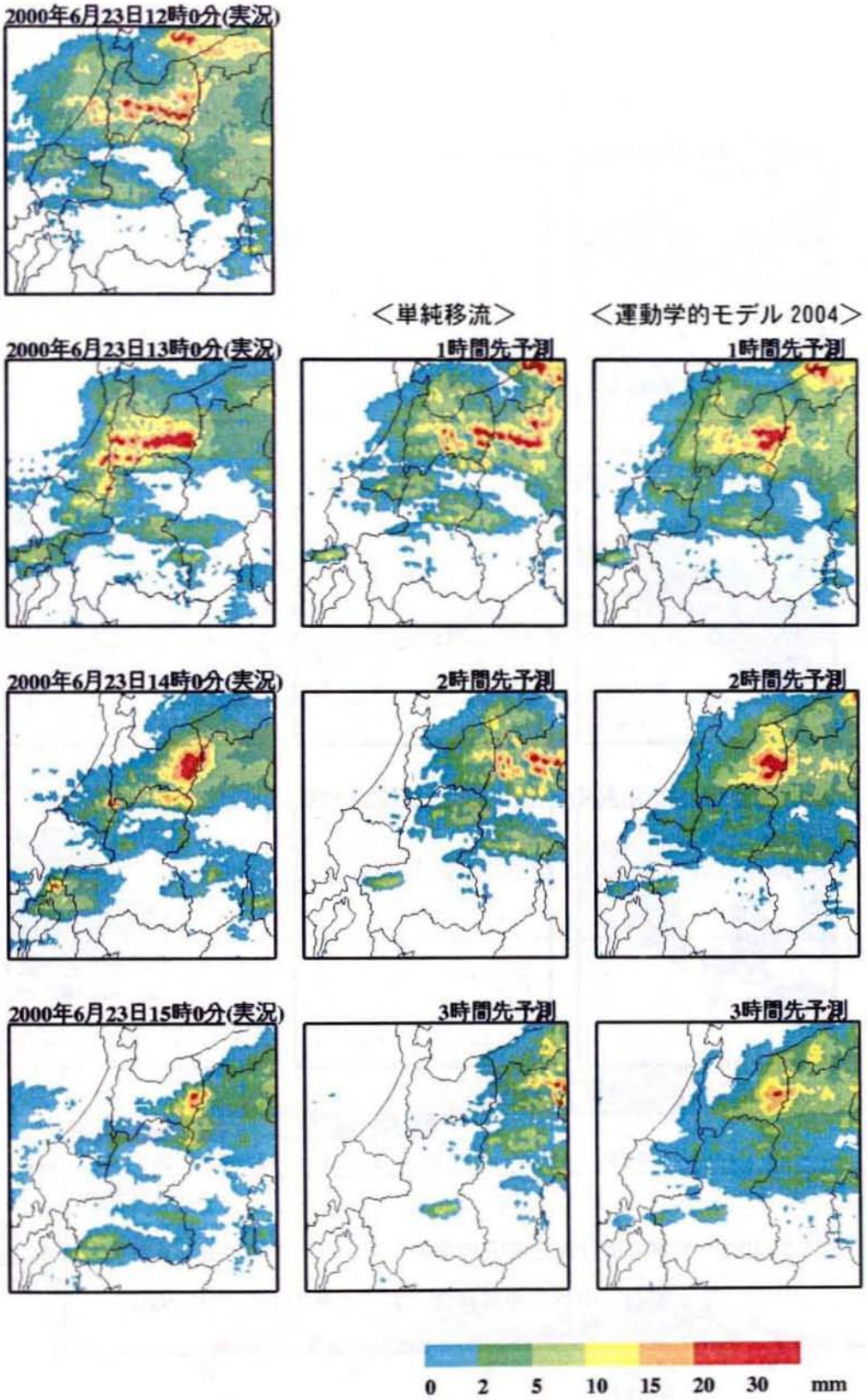


図-3.2.12(a)　予測雨量分布と実況雨量分布の比較（1 時間先～3 時間先予測）

（左：実況　中央：単純移流　右：運動学的モデル 2004）

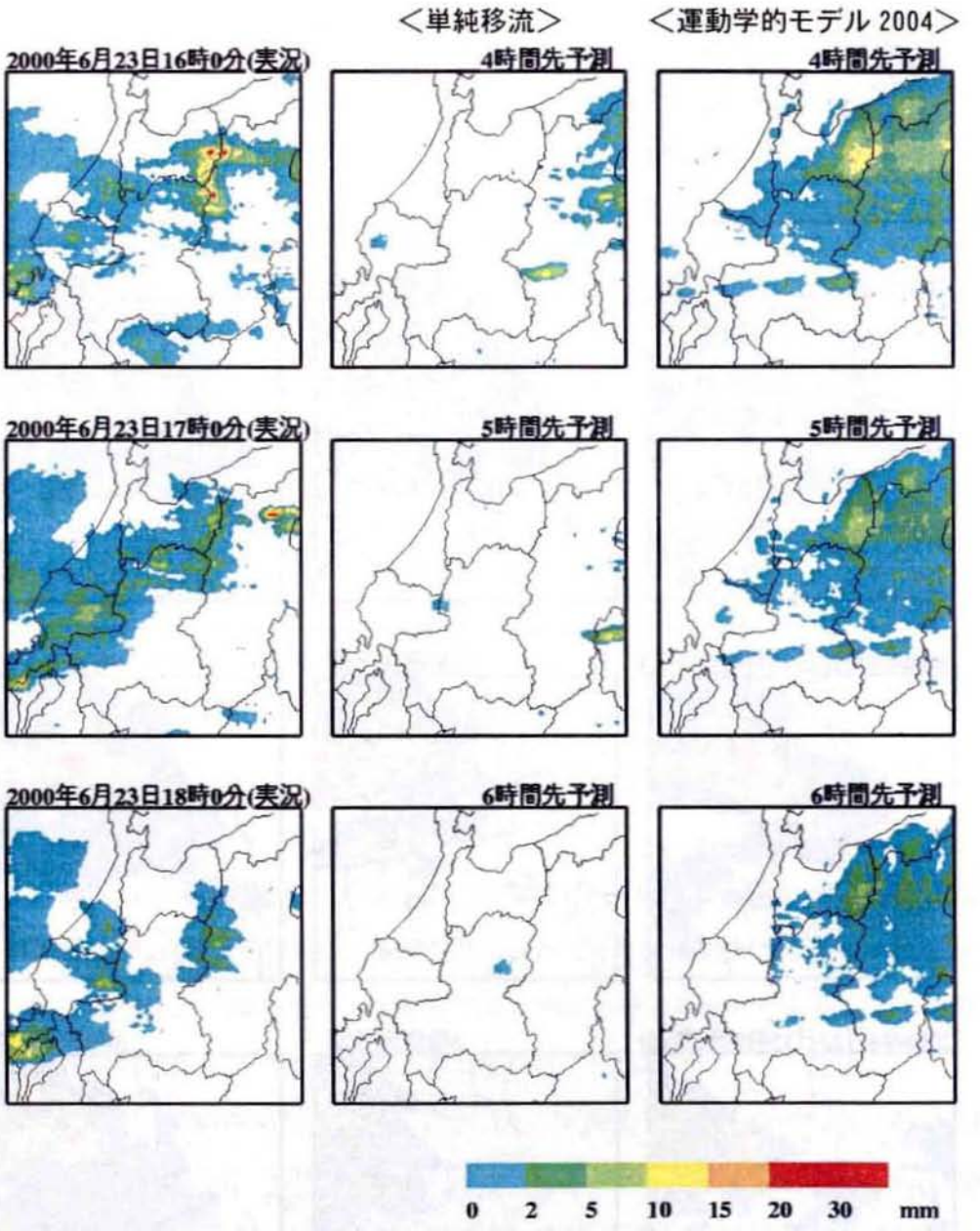


図-3.2.12(b)　予測雨量分布と実況雨量分布の比較（4 時間先～6 時間先予測）

（左：実況　中央：単純移流　右：運動学的モデル 2004）

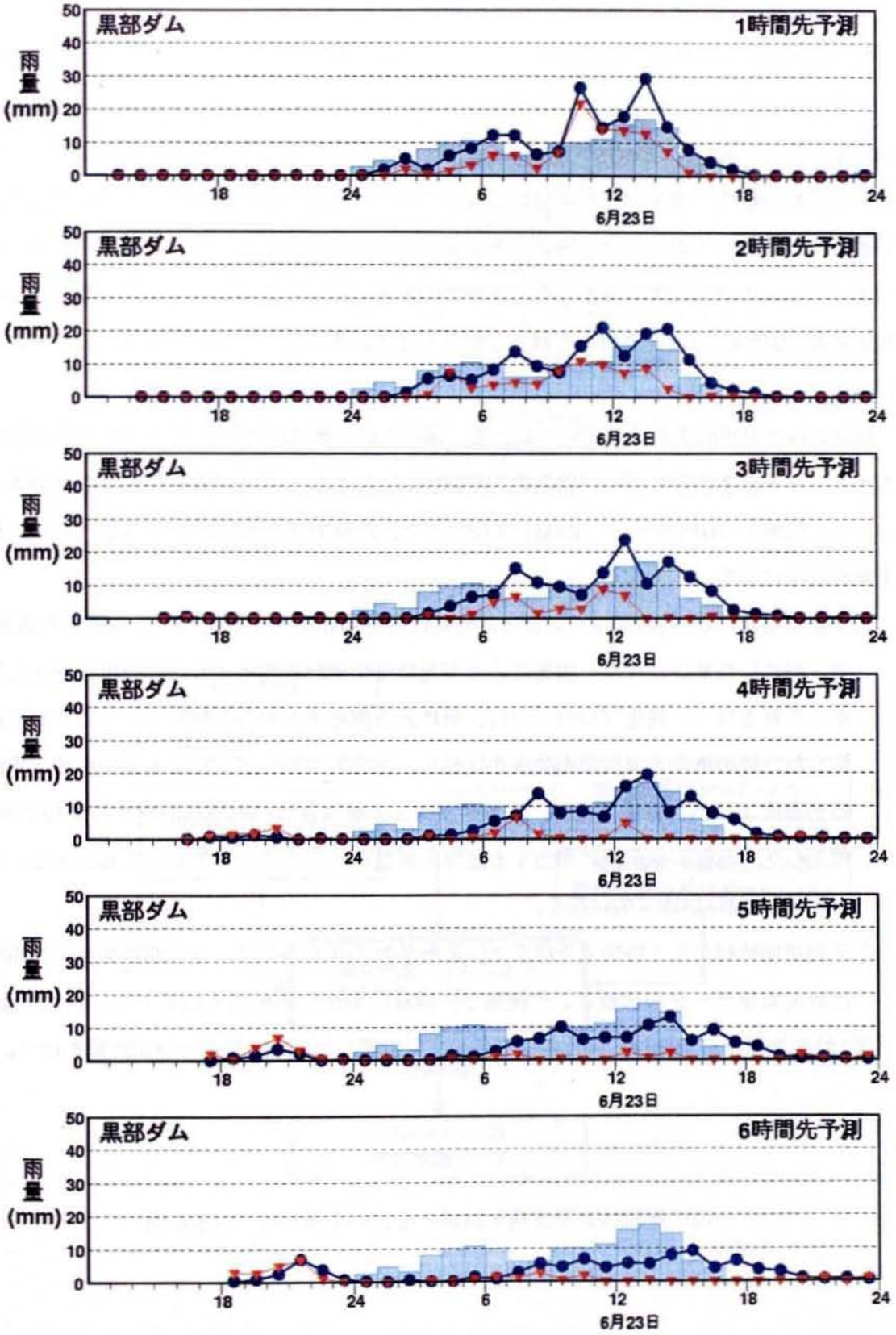


図-3.2.13　実況雨量と予測雨量の時系列（黒部ダム地点）

（棒グラフ：地上雨量実況　▼：単純移流　●：運動学的モデル 2004）

（３）物理的手法による降雨予測モデルの適用

物理的手法による降雨予測モデル（以下、物理的予測モデル）は、運用上の計算安定性と予測精度を総合的に考慮し、日本気象協会で開発された静力学系・ブジネスク近似による局地気象モデルのANEMOS[30]を用いることとした。本研究では、物理的予測モデルのモデル内の物理量を、実況データを用いて補正する「同化手法」を適用することによって、予測時間が短い時間帯における物理的予測モデルの精度向上を図った。同化手法には、レーダーデータを用いた実況降雨分布と運動学的手法の結果によって、物理的予測モデルの水蒸気量・温度場の3次元部分布を補正しながら逐次計算を行う手法[31]を適用することとした。

図-3.2.14に物理的予測モデルのフローを、図-3.2.15に物理的予測モデルにおける同化のタイミングを示す。本モデル（物理的モデル2004）においては、境界条件および初期条件として、気象庁のGPVデータ（RSM）を使用した。計算条件を表-3.2.1に示す。また、計算手順を以下に示す。

①予測初期時刻から3時間さかのぼった時刻に計算開始時刻を設定し、予測初期時刻まで、前述した補正レーダー雨量による実況値を物理的予測モデルに10分毎に同化しながら計算を行う。同化プロセスでは、物理的予測モデルの各予測メッシュにおいて計算された降雨強度と実況降雨強度を比較し、物理的予測モデルによる降雨強度が実況降雨強度より小さい場合には、該当メッシュ上層の各層の水蒸気混合比を増加させ、増加した水蒸気の気化熱に相当する温度を気温から引くことで気温場を修正する。この同化の計算は3次元的に行う。

②予測初期時刻から２時間先予測までは運動学的予測モデルによる予測結果を①で用いた実況雨量データの代替として使用し、同様の手法で物理的予測モデルに同化する。

③2時間先以降の予測は、同化手法を用いずに計算し、6時間先まで予測計算を行う。

表-3.2.1　物理的予測モデルの計算条件

中心緯度，経度	北緯 35°00′，東経 136°30′
計算時間ステップ	30 秒
計算領域	600km×600km
水平格子間隔	10km×10km
鉛直格子座標	上端 5400m，18 層
同化インターバル	10 分
同化に用いるデータ	・3 時間前～予測初期時刻 レーダー雨量データを地上雨量によってキャリブレーションした補正レーダー雨量（実況値） ・予測初期時刻～2 時間先 運動学的予測モデルによる予測雨量

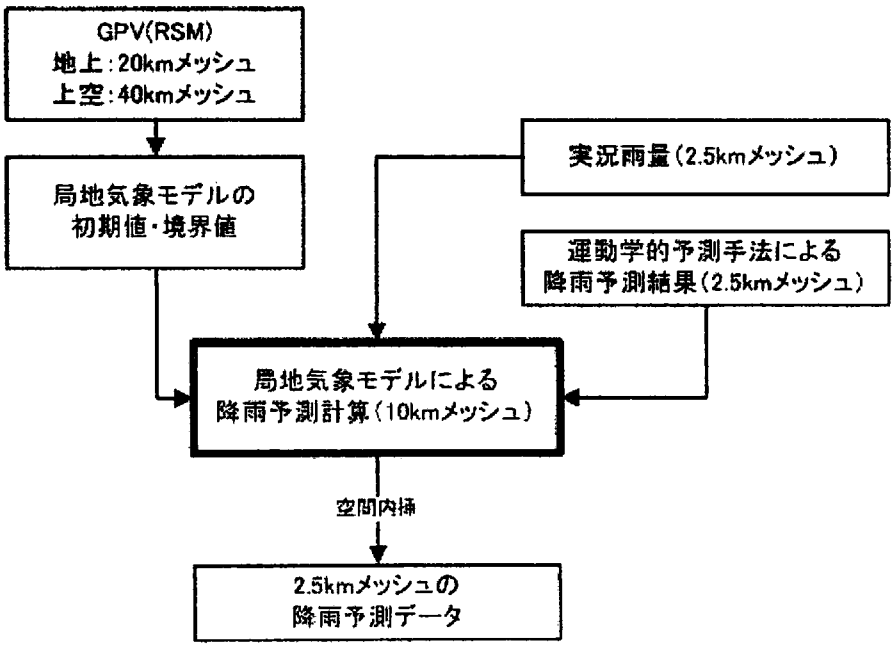


図-3.2.14　物理的手法による降雨予測モデルの計算フロー

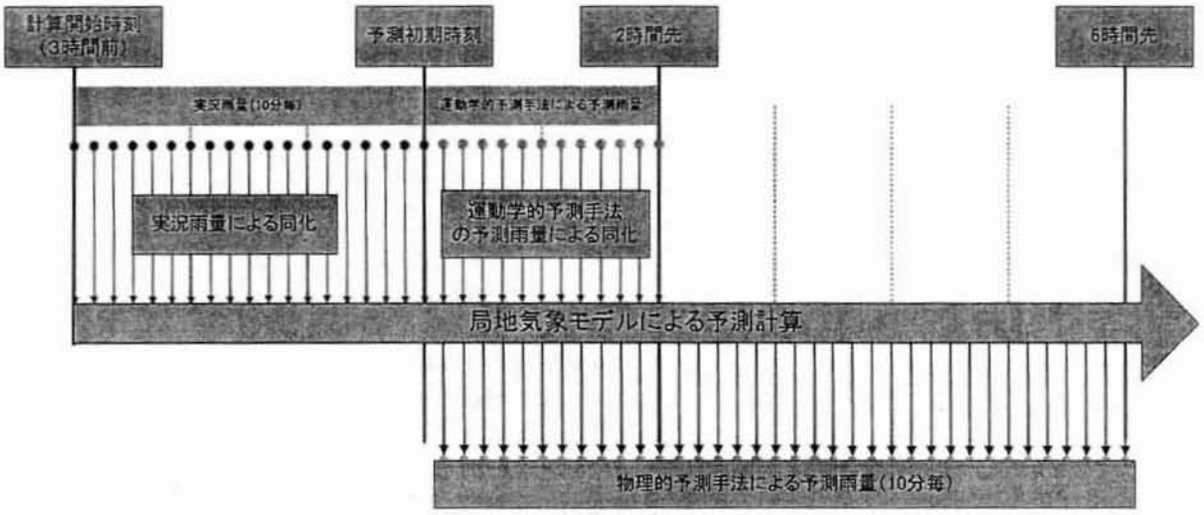


図-3.2.15　同化のタイミング

（4）ハイブリッド降雨予測モデルの構築

本研究で構築したハイブリッド降雨予測モデルは、1～6 時間先までの最適な降雨予測結果を得るため、運動学的予測モデルと物理的予測モデルの予測結果を合成するものである。

具体的には、2.5km メッシュで算出した、運動学的モデル、物理的モデルによる予測雨量を次式により合成する。

$$R = R_1 \times C + R_2 \times (1 - C) \qquad (3.2.11)$$

ここに、

R ：ハイブリッド降雨予測モデルによる予測雨量(mm/hour)

R_1：運動学的モデルによる予測雨量(mm/hour)

R_2：物理的モデルによる予測雨量(mm/hour)

C ：合成係数

合成係数 C は、表 3.2.2 に示す 17 事例を用いて、予測時間に応じて、黒部川全流域における実測値と予測値の相関係数が最大となるように決定した。決定した合成係数 C を表-3.2.3 に示す。

表-3.2.2　降雨事例一覧

降雨番号	開始時刻	終了時刻	降雨成因
1	1999 年 06 月 15 日 18 時	1999 年 06 月 20 日 12 時	停滞前線
2	1999 年 06 月 23 日 12 時	1999 年 06 月 25 日 18 時	停滞前線
3	1999 年 06 月 26 日 18 時	1999 年 06 月 28 日 03 時	停滞前線
4	1999 年 06 月 29 日 06 時	1999 年 07 月 01 日 12 時	停滞前線
5	1999 年 07 月 02 日 06 時	1999 年 07 月 04 日 06 時	停滞前線
6	1999 年 09 月 13 日 18 時	1999 年 09 月 15 日 23 時	停滞前線＋台風
7	1999 年 09 月 20 日 00 時	1999 年 09 月 23 日 06 時	停滞前線＋台風
8	2000 年 06 月 08 日 12 時	2000 年 06 月 09 日 21 時	停滞前線
9	2000 年 06 月 22 日 12 時	2000 年 06 月 25 日 00 時	停滞前線
10	2000 年 06 月 27 日 00 時	2000 年 06 月 28 日 21 時	停滞前線
11	2000 年 07 月 14 日 12 時	2000 年 07 月 16 日 06 時	停滞前線
12	2000 年 09 月 08 日 12 時	2000 年 09 月 13 日 03 時	停滞前線＋台風
13	2000 年 09 月 23 日 00 時	2000 年 09 月 25 日 18 時	低気圧
14	2001 年 06 月 18 日 18 時	2001 年 06 月 21 日 00 時	低気圧
15	2001 年 06 月 23 日 15 時	2001 年 06 月 26 日 00 時	停滞前線
16	2001 年 06 月 30 日 00 時	2001 年 07 月 01 日 03 時	低気圧
17	2001 年 07 月 05 日 18 時	2001 年 07 月 07 日 00 時	低気圧

：本研究による特別観測データが存在する事例

表-3.2.3　合成係数 C

予測時間 (時間)	合成係数 C (運動学的モデルの比率)	1-C (物理的モデルの比率)
1	0.94	0.06
2	0.72	0.28
3	0.58	0.42
4	0.34	0.64
5	0.29	0.71
6	0.27	0.73

（5）精度検証

気象庁の降水短時間予報が 6 時間先まで提供されるようになった 2001 年 4 月以降の降雨事例を対象として、ハイブリッドモデル 2004 の精度検証を行った。表-3.2.4 に精度検証に用いた 4 つの降雨事例を示す。

図-3.2.16 に実況雨量分布図と予測雨量分布図の比較の一例を示す。 図から、黒部川流域周辺の予測降雨分布が実況雨量分布と良く合致していることがわかる。

図-3.2.17 に現時点から 3 時間先と 6 時間先の、気象庁降水短時間予報の予測値およびハイブリッドモデル 2004 による予測雨量の時系列による比較例を示す。ここで示す雨量は黒部川流域の平均雨量である。両手法による予測結果を比較すると、気象庁降水短時間予報

よりもハイブリッドモデル 2004 の方が的確に実況値を予測できていることがわかる。

表-3.2.4　　予測計算を実施した降雨事例

降雨番号	開始時刻	終了時刻	降雨成因
14	2001 年 06 月 18 日 18 時	2001 年 06 月 21 日 00 時	低気圧
15	2001 年 06 月 23 日 15 時	2001 年 06 月 26 日 00 時	前線
16	2001 年 06 月 30 日 00 時	2001 年 07 月 01 日 03 時	低気圧
17	2001 年 07 月 05 日 18 時	2001 年 07 月 07 日 00 時	低気圧

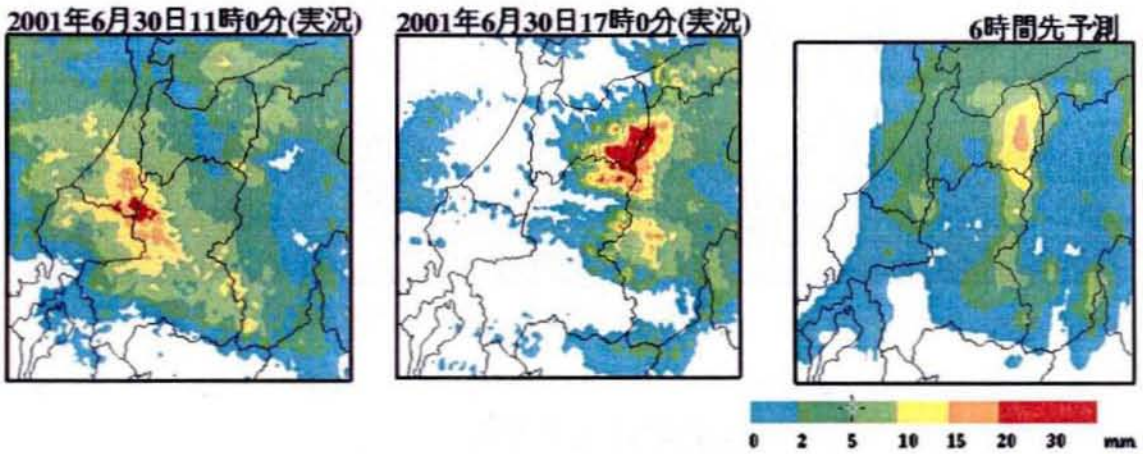


図-3.2.16　降雨分布図

（左：予測初期　中央：6 時間先実況　右：ハイブリッドモデル 2004 による 6 時間先予測）

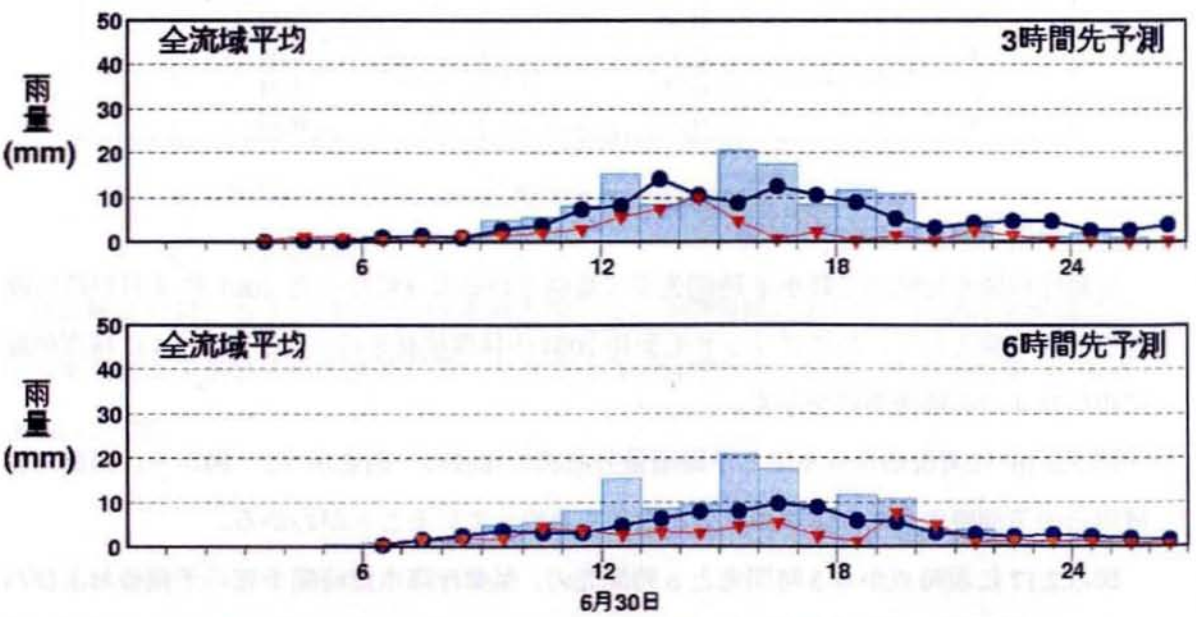


図-3.2.17　実況値と各予測結果の時系列比較（上：3 時間先、下：6 時間先）

（棒グラフ：実況　▼：気象庁降水短時間予報　●：ハイブリッドモデル 2004）

つぎに、相関係数、RMSE、総雨量比（予測雨量／実況雨量）の各指標を用いた精度比較の結果を図-3.2.18 に示す。すべての指標のすべての予測時間において、気象庁降水短時間予報と比較して、ハイブリッドモデル 2004 が優れた精度を確保していることがわかる。予測時間が長くなるにつれて予測精度は劣化するものの、ハイブリッドモデル 2004 では、6 時間先までの黒部川流域の平均予測雨量で、相関係数 0.5 以上、 RMSE4.0(mm)以下、総雨量比 0.8～1.2 の精度を確保している。

以上のように、本研究で開発したハイブリッドモデル 2004 は気象庁降水短時間予報よりも優れた精度を有することが示された。また、配信間隔の観点からも気象庁降水短時間予報の 30 分毎に対して、ハイブリッドモデル 2004 は 10 分毎の予測計算が可能であることから、ハイブリッドモデル 2004 は実用性で勝るものと考える。

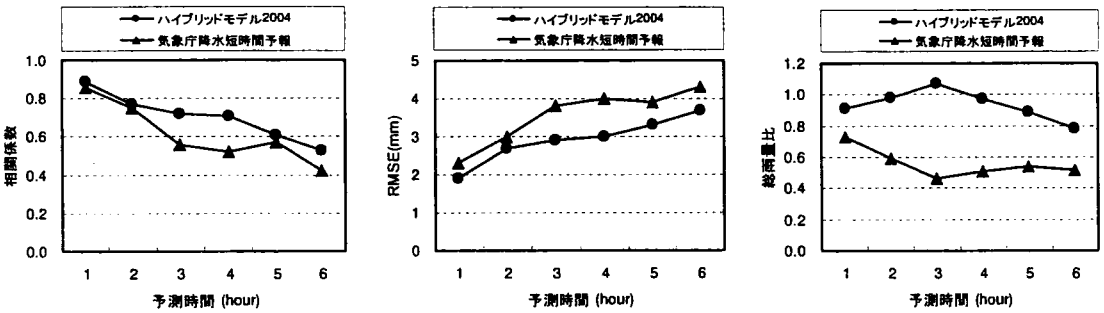


図-3.2.18　予測精度比較

３．２．３　まとめ

本節では、まず各種の降雨予測手法について整理した後、運動学的手法に第２章で見出された黒部峡谷の降雨特性を反映したモデルと、物理的手法を合成（ハイブリッド）することにより６時間先までの降雨予測を高精度で行う手法を開発し、精度検証結果について述べた。

本節で得られた成果をまとめると以下のとおりである。

①山岳域特有の降雨停滞特性や降雨発達特性などを考慮する運動学的手法による降雨予測モデル（運動学的モデル 2004）を開発した。

②物理的予測モデルには、レーダーデータおよび運動学的モデルを用いた予測結果から、水蒸気量が逐次修正される同化手法を適用した（物理的モデル 2004）。

③1～6 時間先までの最適な降雨予測結果を得るため、運動学的モデル 2004 と物理的モデル 2004 の予測結果を最適に合成する手法（ハイブリッドモデル 2004）を開発した。

④開発したハイブリッドモデル 2004 は気象庁降水短時間予報よりも優れた精度を有し、配信間隔も短いことから、ハイブリッドモデル 2004 は実用性で勝るものと考える。

３．３　最新技術の活用による降雨予測手法の高度化

本節では、第２節で述べた手法をベースとして、最新の技術を適用して高度化を行った結果について述べる。降雨予測に関する最新の技術としてまず、可降水量データを、つぎに気象庁配信の最新データである MSM データ、ウインドプロファイラ、1km メッシュ合成レーダーデータを取り上げ、これらを活用して予測精度を向上させる手法について述べ、その効果の検証を行う。本節で述べるモデルを、前節のモデルと同様にそれぞれ、ハイブリッドモデル 2005、運動学的モデル 2005、物理的モデル 2005 と称する。

３．３．１　可降水量データの活用による降雨予測手法の高度化[32)]

（１）可降水量データ活用の必要性

第２節で述べた降雨予測手法（ハイブリッドモデル 2004）は、レーダー情報をベースとした運動学的モデルと、同化手法を取り入れた局地気象モデルを用いた物理的モデルを組み合わせることより６時間先までの降雨分布を予測するものであり、前述のとおり既存の降雨予測手法の精度を上回っている。しかしながら、ダム操作上特に着目すべき出水の立ち上がりを予測するために重要となる、降雨開始のタイミングおよび降雨量の予測精度に改善の余地がある。（図-3.3.1 参照）

その原因として、入力データとして用いる気象庁配信の GPV による水蒸気移流量の予測値の精度が影響しており、この予測値を実況値に置き換えることで、予測精度の向上が可能なものと推察する。

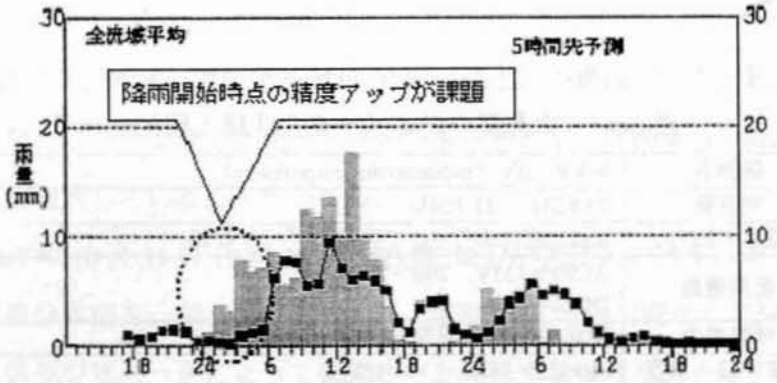


図-3.3.1　降雨時系列（2000 年 6/22 13 時 ～ 6/25 0 時）

（棒グラフ：実況雨量　折れ線グラフ：ハイブリッドモデル 2004 による予測結果）

水蒸気の実況データとしては、近年、可降水量が注目されており、降雨予測における可降水量の利用に関する研究としては、神田ら [33] による東京での集中豪雨事例の解析等があり、豪雨に先行して可降水量が増加すること、降雨開始の先行指標として利用できる可能性が指摘されている。

一方、この可降水量のデータ取得方法に着目すると、水蒸気ラジオメータなどによる直接観測のほか、GPS 観測データを利用して解析的に算出する方法がある。前者で恒久的な観測を目的とした場合、設置および維持管理に要する費用が問題となる。また後者による場合、例えばドイツにおいては GPS 可降水量がほぼ実時間で利用可能な状況である [34] ものの、2006 年現在のわが国において、精密な GPS 衛星の軌道情報が得られるまでに要する時間を考慮すると、GPS 可降水量は実時間では利用できないという問題がある。

これらの状況をふまえ、以下において、第２節で述べた降雨予測手法の更なる高度化を目的として、まず、水蒸気ラジオメータにより可降水量の現地観測を行い、可降水量変動と降雨量の関係について考察する。つぎに可降水量を用いた降雨開始の指標を提案し、最後に実時間で入手可能なデータを用いた可降水量推定手法について論じる。

（２）可降水量変動と降水量の関係

黒部峡谷周辺における降雨発生前後の可降水量と地上雨量の対応を調べるために、2003 年 10 月 9 日～11 月 5 日の期間に、富山平野において水蒸気ラジオメータによる可降水量の観測を行った。図-3.3.2 に水蒸気ラジオメータの設置位置を示す。用いた水蒸気ラジオメータの仕様を表-3.3.1 に示す。観測仰角は 17 仰角（25.2、30.1、35.1、40.0、50.0、54.9、59.9、75.2、90.0、104.8、120.2、125.1、130.1、139.9、144.9、149.8、154.8 度）を設定し、測器設置地点を中心とする南北断面の連続観測を行った。データ処理は図-3.3.3 に示すフローで実施した。

表-3.3.1　水蒸気ラジオメータの仕様と観測モード

機器名	WVR-1100（radiometrics corporation）
周波数	23.8GHz　31.4GHz
設定・出力	RS232C により PC で設定・データ収録
使用電源	AC90～135V，200～270V DC22～32V
消費電力	測定中 17W　観測中 30W
本体寸法・重量	40×28×74cm　・　15kg
観測仰角 （17 仰角）	25.2，30.1，35.1，40.0，50.0，54.9，59.9，75.2，90.0，104.8，120.2，125.1，130.1，139.9，144.9，149.8，154.8 度

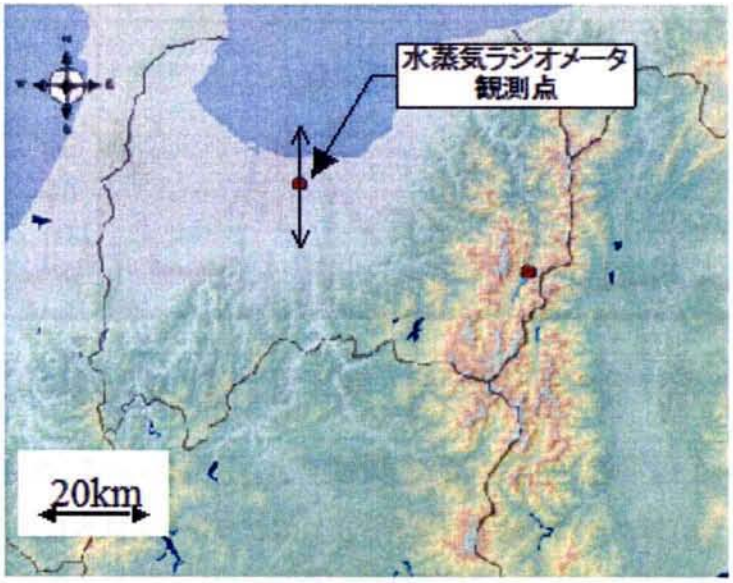


図-3.3.2　　水蒸気ラジオメータ設置位置

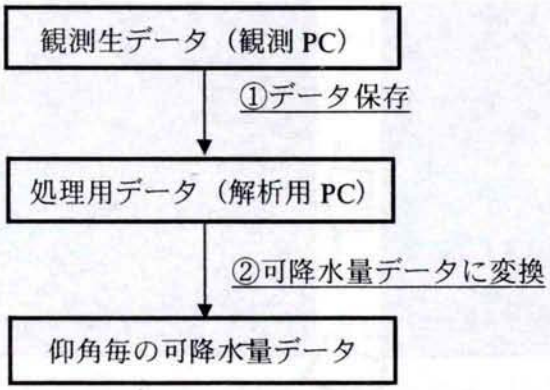


図-3.3.3　水蒸気ラジオメータのデータ処理フロー

図-3.3.4 に水蒸気ラジオメータによる仰角 90 度（直上）の観測データと観測地点に隣接する富山地方気象台における地上雨量データの時系列を示す。同図から、降雨の開始に先行して可降水量が増大していることがわかる。

図-3.3.5 に 2003 年 10 月 11 日 18 時 30 分～23 時 00 分の期間における、90 分毎の気象庁合成レーダー雨量分布図を、図-3.3.6 に 25.2 度（北側）、90.0 度（直上）、154.8 度（南側）の各仰角の水蒸気ラジオメータによって観測された可降水量の時系列を示す。

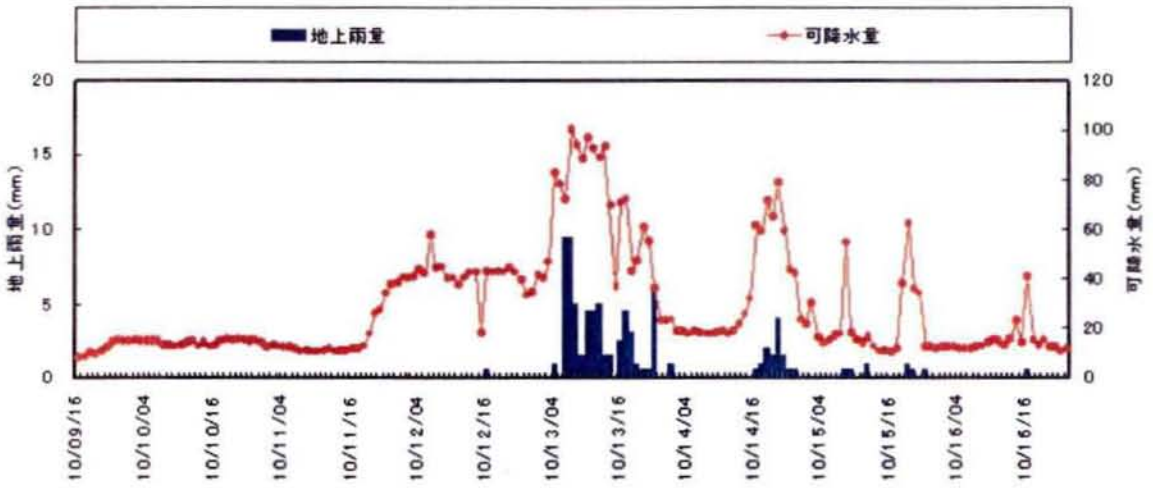


図-3.3.4　地上雨量（「富山地方気象台」）と可降水量の時系列

（棒グラフ：地上雨量　　折れ線グラフ：可降水量）

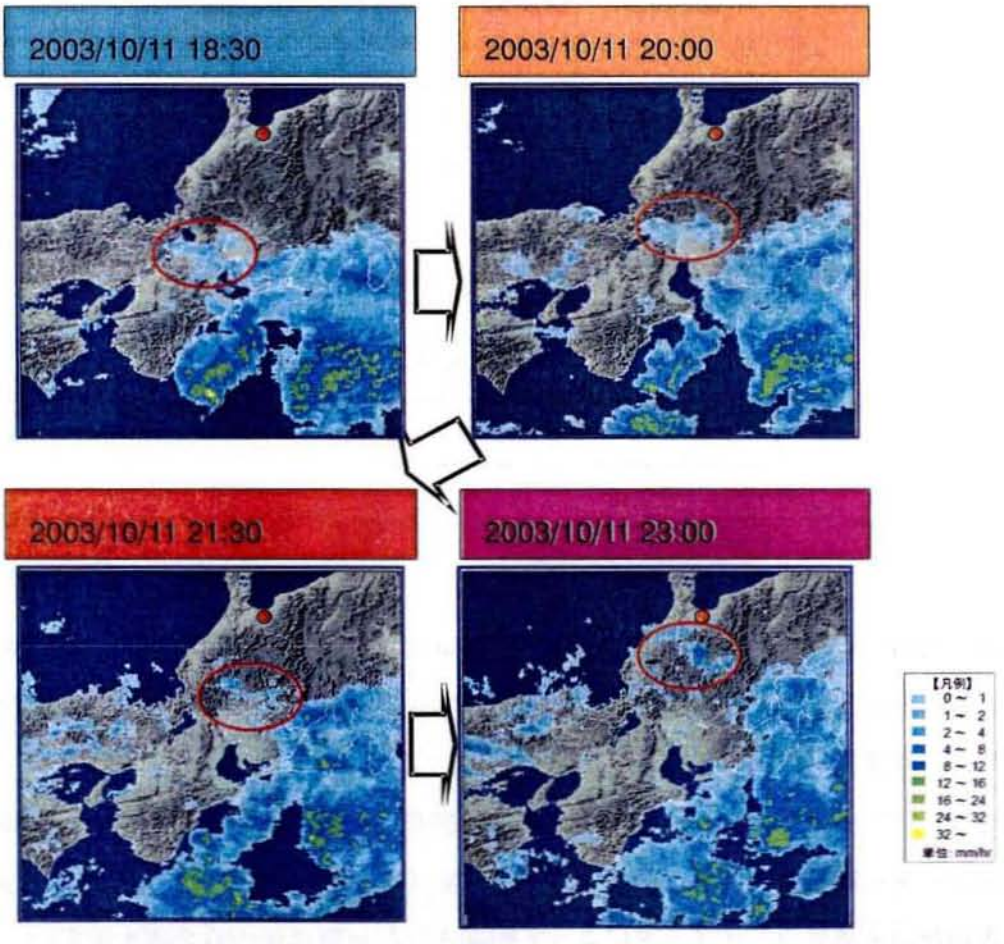


図-3.3.5　気象庁合成レーダー雨量分布図

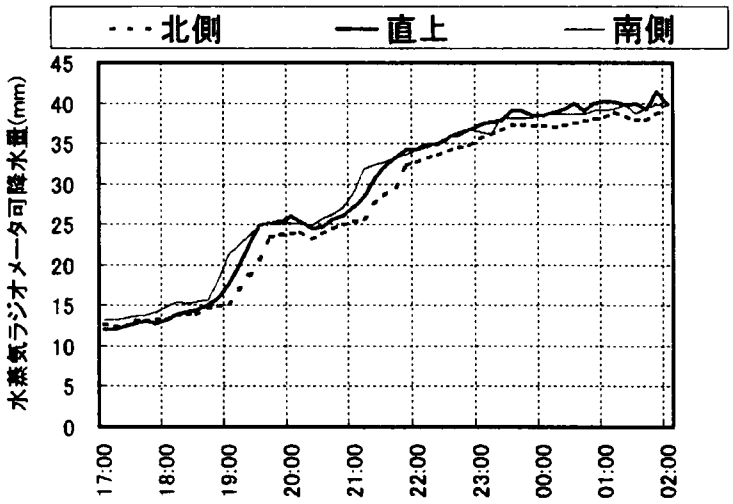


図-3.3.6　可降水量の経時変化（観測方向毎）

図-3.3.6 に示す観測期間中には地上雨量は観測されていないが、図 3.3.5 のレーダー雨量分布図から、10 月 11 日 23 時には水蒸気ラジオメータ観測点周辺の上空にレーダーエコーがかかっていることが見て取れる。これらの図から、富山平野に近づいてくる雨域は南南西～北北東の方向に移動しており、水蒸気ラジオメータによってとらえられた可降水量の変動は観測点から見て、南・直上・北の順に可降水量の増大が観測されており、可降水量の変動と雨雲の移動が良く対応していることがわかる。

また、図-3.3.6 の可降水量の南側データと北側データの変化には、約 30～45 分の時間差があることがわかる。大気中の水蒸気の大部分が大気下層に集中していることを踏まえ、計測された可降水量が高度 5,000m 以下の水蒸気量の積算であると仮定すると、南側（仰角 154.8 度）および北側（仰角 25.2 度）の計測データは、図-3.3.2 の矢印に示すように、観測点を始点とした南北それぞれ約 11km の範囲の水蒸気量を反映していると考えられる。したがって、降水過程、雲物理過程を伴わずに大気塊が南北 22km の観測断面を 30～45 分で移流したと仮定した場合、水蒸気ラジオメータによってとらえられた観測断面方向の水蒸気の移流速度は、約 29～44km/hour 以下であると推察される。一方、図-3.3.5 の雨域は 35km から 40km を 90 分程度（約 25km/hour）かけて移流しており、このことから研究対象領域に降雨が南方から接近する場合の雨域の移流速度は可降水量変動の速度と同程度であるといえる。

これらの観測結果から、可降水量は地上降水量に先行して増大しており、降雨開始の先行指標として利用可能であるとの示唆を得た。

（３）降雨開始指標としての可降水量

（２）で示した黒部峡谷周辺における可降水量の変動と降雨開始との関係を踏まえて、可降水量データを用いた降雨開始指標の検討を行った。可降水量データとしては、まず空間的に密に存在する GPS 可降水量を用いることとした。GPS 可降水量を用いて黒部峡谷周辺における降雨開始と可降水量の変動の関係を調べた。GPS 可降水量は、文部科学省振興調整費による特別研究「GPS 気象学」プロジェクトによる可降水量データベース[35]に整理されている 3 時間毎のデータを用いた。ハイブリッドモデル 2004 の開発と同様に、表-3.2.2 に示した 1999～2001 年の期間において黒部峡谷周辺で比較的規模の大きな降雨が発生した 17 事例を用いて検討を行った。

図-3.3.7 に検討に用いたデータの位置（国土地理院 GPS 観測点、気象庁アメダス観測点、気象官署観測点）を示す。

国土地理院 GPS 観測点における GPS 可降水量は、①標高補正　②空間メッシュ展開　を行い、約 5.5km メッシュのレーダーアメダス解析雨量のメッシュに展開した。つぎに、解析対象領域内の気象官署（10 地点）のメッシュについて、3 時間毎の可降水量から時間方向の線形内挿によって 1 時間データを作成した。

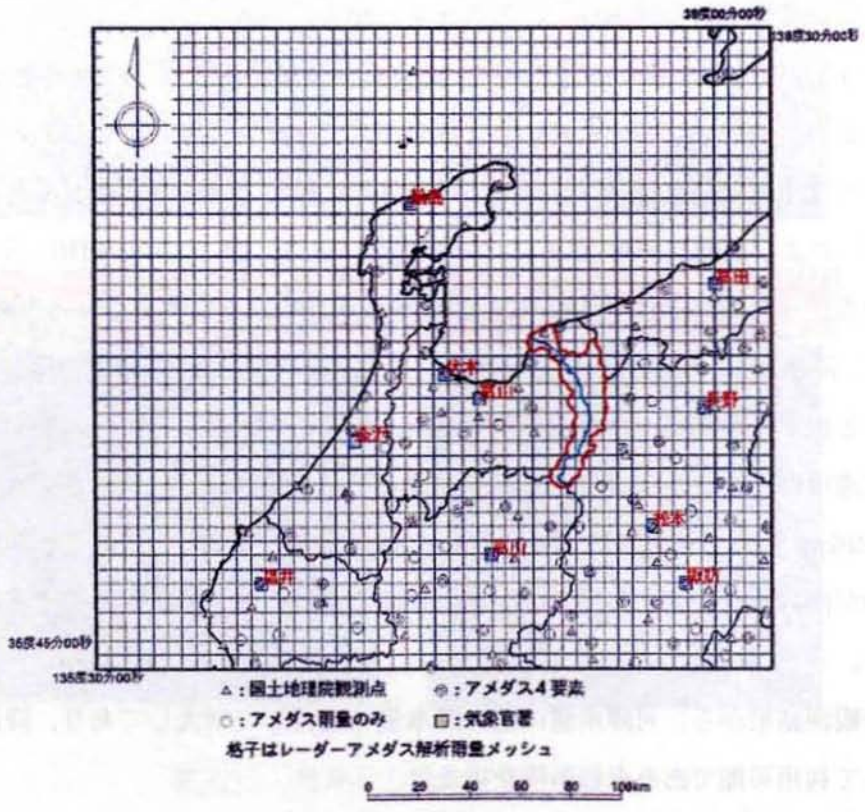


図-3.3.7　データポイント位置図

GPS 可降水量と各気象要素（気圧、気温、相対湿度、風向、風速）および黒部峡谷内における地上雨量の時系列データの変化傾向から、黒部峡谷周辺の可降水量と気圧の変化量を組み合わせて算出した降雨開始指標を抽出した。降雨開始指標とは、気圧の二次微分に相当する変化量と可降水量の増加量を組み合わせた、式(3.3.1)～(3.3.4)で定義する $R\_Sig(t)$ である。

$$R\_Sig(t) = \begin{cases} 1 & (DPW(t) - DDP(t) \geq 2) \\ 0 & (DPW(t) - DDP(t) < 2) \end{cases} \tag{3.3.1}$$

$$DPW(t) = \sum_{K=0}^{6} \frac{PW(t-K) - PW(t-K-1)}{(K+1)^2} \tag{3.3.2}$$

$$DDP(t) = \sum_{K=0}^{6} \frac{DP(t-K) - DP(t-K-1)}{(K+1)^2} \tag{3.3.3}$$

$$DP(t) = P(t) - P(t-1) \tag{3.3.4}$$

ここに,

$PW(t)$　：可降水量（mm）

$P(t)$　：気圧（hPa）

t　：時間（hour）

この「降雨開始指標」は、全般的な降雨に対する適用性を考慮して、①気圧降下量の増大による対象領域への大気の収束および上昇流の強化による水蒸気から雲粒への変換、②雲粒のもととなる水蒸気量の増大、を用いて作成した指標である。ただし、気圧 1hPa は可降水量 1mm 分の水圧に相当していることを考慮し、そのまま差をとっている。また、「降雨開始指標」の算出には、6 時間前から最新時刻までの可降水量変化量および気圧の 2 次微分量を用いているが、現在時刻に近い時間のデータにより重きを置くように、時間数の自乗で除した値の積算値で表現している。これらの、自乗で除すという設定および式(3.3.1)の降雨開始指標に用いた閾値「2」は、検討対象降雨の 17 事例の可降水量、気圧の時系列データから試行錯誤的に決定した。

この降雨開始指標を気象官署観測点毎に計算し、「輪島」、「金沢」、「伏木」、「富山」の 4 地点全ての観測点において、 $R\_Sig(t)$ が 1 となる場合を、黒部峡谷周辺で降雨が発生する

と予測する指標とした（以降、「降雨開始指標」と称する）。図-3.3.8 に黒部峡谷の流域平均雨量と降雨開始指標の時系列図の一例を示す。図から一部空振りがあるものの、降雨のピークに先行して降雨開始を予測していることがわかる。また、全 17 事例中、15 事例で良好な結果を得ており、本研究で提案した「降雨開始指標」は、一般的な降雨に対して有効な指標であると評価した。

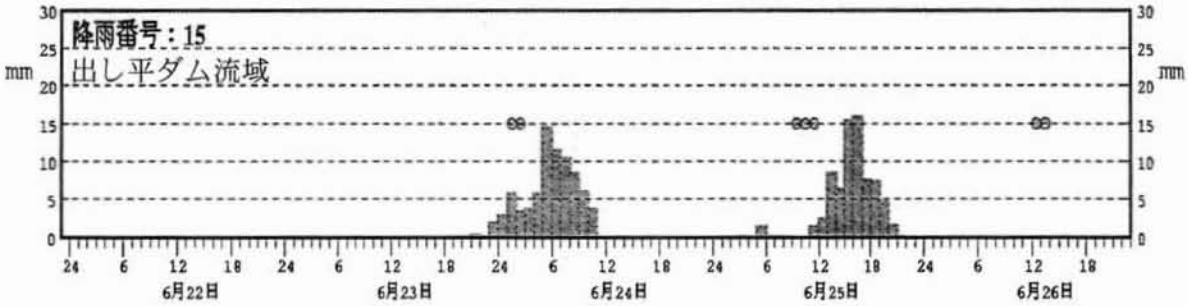


図-3.3.8　黒部峡谷内の地上雨量（棒グラフ）と降雨開始指標（●）の時系列

（４）実時間利用を考慮した可降水量推定式

2006 年現在の日本においては、GPS 可降水量は、精密な GPS 衛星の軌道情報が得られるまでに数時間を要し、実時間では利用することができないため、前章で検討した降雨開始指標は実時間で利用できないのが現状である。実運用システムにおいて、（３）で検討した降雨開始指標を利用可能とするために、実時間で利用可能なデータを用いて可降水量を推定する手法の検討を行った。一般的に、水蒸気は地上付近に多く存在しているため、地上の水蒸気混合比が、可降水量と最も相関が良いと考えられるが、上空の水蒸気情報も考慮に入れるため、GMS 衛星データも併用した可降水量推定式を作成することとした。なお、GMS データは約 5km メッシュのデータである。図-3.3.9 に黒部峡谷周辺における GMS メッシュポイントの対応を示す。

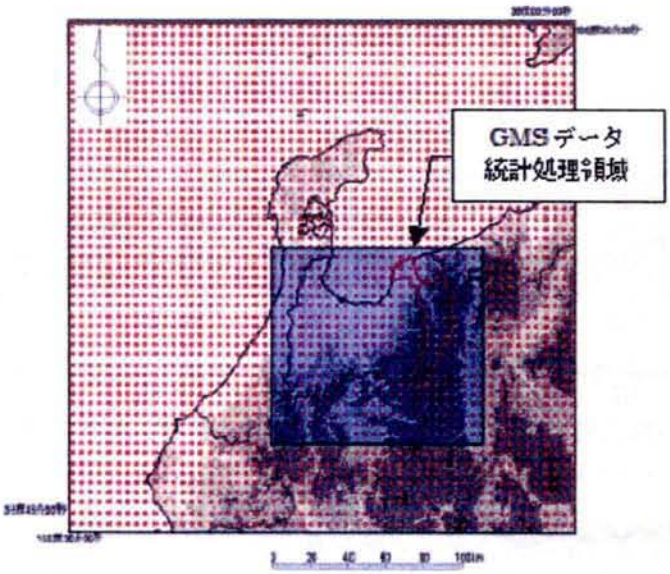


図-3.3.9　GMS データの解析対象領域

本研究の解析では、図-3.3.9 中に枠で囲った「GMS データ統計処理領域」に含まれるデータを統計処理することによって利用することとした。解析手法としては線形重回帰分析手法を用いた。重回帰分析において、目的変数として GPS 可降水量を設定し、説明変数として、可降水量に対して支配的な地上の水蒸気混合比データ、および上空の水蒸気分布の影響を受けると考えられる GMS データからなる以下に示す 7 変数を設定した。

①水蒸気混合比データ（g/kg）

②GMS（赤外 1）輝度温度の解析対象領域の平均（℃）

③GMS（赤外 1）輝度温度の解析対象領域の標準偏差（℃）

④GMS（赤外 2）輝度温度の解析対象領域の平均（℃）

⑤GMS（赤外 2）輝度温度の解析対象領域の標準偏差（℃）

⑥GMS（水蒸気）輝度温度の解析対象領域の平均（℃）

⑦GMS（水蒸気）輝度温度の解析対象領域の標準偏差（℃）

表-3.3.2 に線形重回帰解析結果、図-3.3.10 に推定可降水量と GPS 可降水量の時系列の一例を示す。これらの図表から、推定可降水量は GPS 可降水量と 0.8 以上の相関にあり、RMSE(二乗平均誤差)も 5(mm)程度であることがわかる。大谷ら[36] によれば GPS 可降水量とラジオゾンデから得られる可降水量の間の RMSE は 3.7(mm)であるので、本手法において可降水量の絶対値は概ね妥当に推定できるといえる。

表-3.3.2　重回帰分析の係数および重相関係数，推定可降水量と GPS 可降水量の RMSE

	係数①	係数②	係数③	係数④	係数⑤	係数⑥	係数⑦	定数項	重相関係数	RMSE (mm)
輪島	3.3213	-0.2859	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.6123	-3.1468	0.84	5.3
金沢	3.6791	-2.1123	-4.8474	1.6785	5.1933	0.2727	-1.6404	2.0035	0.85	5.1
伏木	3.7188	-0.4718	-3.9842	0.0000	4.2462	0.4453	-1.3320	7.5326	0.83	5.2
富山	3.4638	-1.5167	-4.2647	1.1042	4.6380	0.3145	-1.4211	4.9337	0.81	5.5

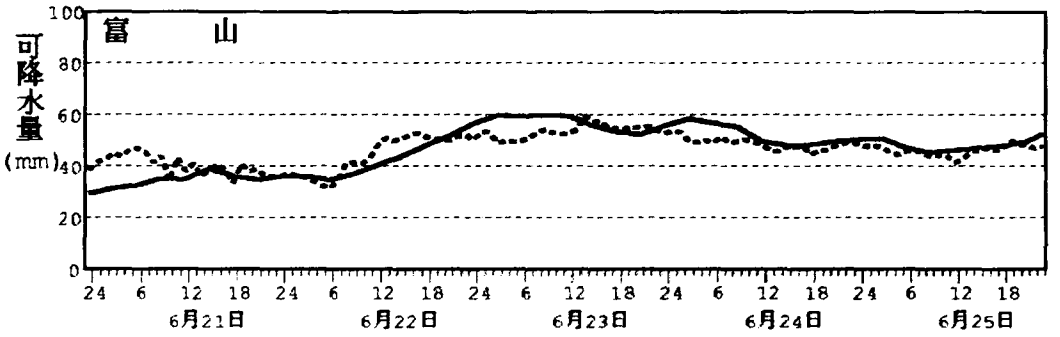


図-3.3.10　GPS 可降水量（実線）と推定可降水量（点線）の経時変化

一方、可降水量の変動については重相関係数から妥当に推定できている。しかし、図-3.3.10 より推定可降水量は GPS 可降水量より短周期の変動を持っていることがわかる。ここで、GPS 可降水量は３時間毎に算出されたものを用いているために実際の短時間水蒸気変動をとらえきれていないことが考えられる。したがって、推定可降水量の算出手法の構造的欠陥に起因して短周期変動が生じているのではない。しかし、（３）で提案した降雨開始指標は GPS 可降水量を用いて開発されたものであるため、式(3.3.1)～式(3.3.4)で用いた可降水量の２次微分は推定可降水量と GPS 可降水量で異なることが影響し、推定可降水量を用いた降雨開始指標では予測が先行すると同時に空振りが増加すると考えられる。そこで図-3.3.11 に、黒部峡谷内の地上雨量と GPS 可降水量を用いて算出した降雨開始指標、推定可降水量を用いて算出した降雨開始指標の時系列を示す。図から推定可降水量を用いて算出した降雨開始指標は、GPS 可降水量を用いた降雨開始指標と比較して、予想通り空振りが増加し、降雨開始予測が先行している。しかし、空振りの増加は著しいものではなく、また、降雨開始予測が先行することは降雨予測システムの使用目的からいえば安全側であるため、実運用上は問題ないと考える。以上の検討から、推定可降水量を用いた降雨開始指標の算出は降雨開始とよい対応にあり、実用上有効であることが示された。

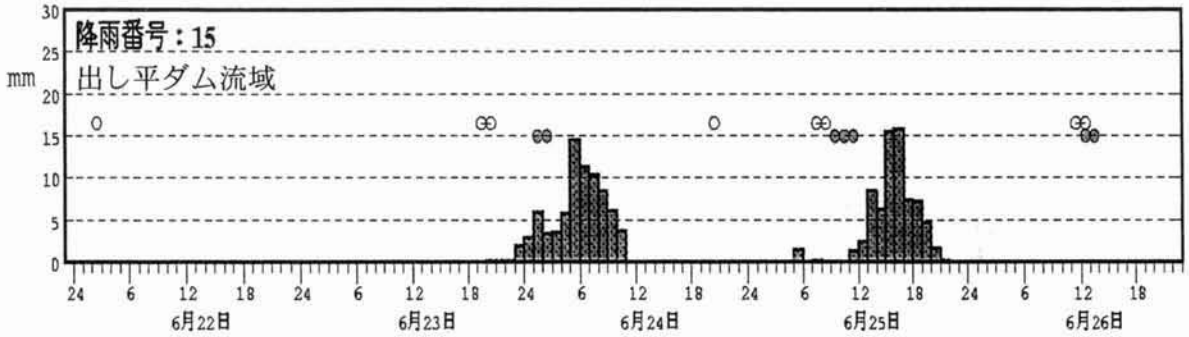


図-3.3.11　黒部峡谷内の地上雨量（棒グラフ）と GPS 可降水量を用いた降雨開始指標（●）と推定可降水量を用いた降雨開始指標（○）の時系列

以上、実ダムにおいて運用中のダム流入量予測システムに含まれる降雨予測手法の更なる高度化の一環として、降雨開始時点の予測精度向上を目的とし、可降水量の利用性検討を行った。得られた結論は以下のとおりである。

①水蒸気ラジオメータを用いた観測から、可降水量は、降水量の発生に先行して変動することがわかった。

②可降水量と気圧を組み合わせた、降雨開始指標を提案した。

③地上気象データ、衛星データを用いた可降水量推定式を提案し、可降水量を用いた降雨予測開始指標を実時間で利用可能とした。

（５）可降水量データ活用手法

まず、可降水量データを用いた降雨開始指標による効果を評価するために、GPS データから算出される可降水量データは実時間では利用できないことを勘案し、実時間で利用可能なデータを用いて可降水量を推定する「推定可降水量データ」を用いた降雨開始指標を用いて予測計算を行った。推定可降水量データを用いた降雨開始指標は、地上気象データ（気温、湿度）、気象衛星データを用いて算出した推定可降水量データと、地上気圧データを用いて算出したものである（前出の式(3.3.1)～(3.3.4) 参照）。

ハイブリッドモデル 2004 を構成する運動学的モデル 2004 では、GPV（RSM）データから算出される 700(hPa)高度の水蒸気移流量が、150(g/kg・m/s)を超える場合に、黒部峡谷内で降雨が発生するようにしているが、前出の推定可降水量データを用いた降雨開始指標が ON になっている場合に、この閾値を 100(g/kg・m/s)に引き下げることとする。（式(3.3.5) および式(3.3.6)参照）。これによって、GPV が水蒸気量を過小予測し、降雨を発生しにくいような予測をしていても、実況データによって降雨が開始しやすいと判断された場合には

降雨を発生させ、見逃しを回避するようになる。

（降雨開始指標が OFF の場合）

$$R_{pot} = \min\{(V_{adv} - 150) \times 0.04, 10.0\} \tag{3.3.5}$$

（降雨開始指標が ON の場合）

$$R_{pot} = \min\{(V_{adv} - 100) \times 0.04, 10.0\} \tag{3.3.6}$$

ここに、

R_{pot} ：黒部渓谷内の降雨発生量の最大値

V_{adv} ：700hPa 高度の水蒸気移流量

（６）精度検証

精度検証には、2000 年 6 月 22～23 日の事例を用いた。この事例は、ハイブリッドモデル 2004 の予測計算では降雨開始時点における予測精度に改善の余地のある事例である。図-3.3.12 に予測雨量と実況雨量の時系列による比較を示す。予測雨量は、第 2 節で構築したハイブリッドモデル 2004 を構成する運動学的モデル 2004 と、可降水量データを用いた運動学的モデルの結果を示した。図-3.3.12 から、以下のことがわかる。

①推定可降水量データを用いた降雨予測開始指標の導入によって、降雨予測開始時点における予測精度が向上した。

②降雨開始指標導入の効果は、流域平均雨量 5mm 未満の降雨開始の予測には効果があるが、流域平均雨量 10mm 程度の降雨の立ち上がりに対する効果は明瞭には見られない。

③降雨開始指標の導入によって、降雨予測精度が悪くなっている時間帯は見られない。

以上のとおり、推定可降水量データの活用により運動学的モデル 2004 のさらなる精度向上が可能であることがわかった。

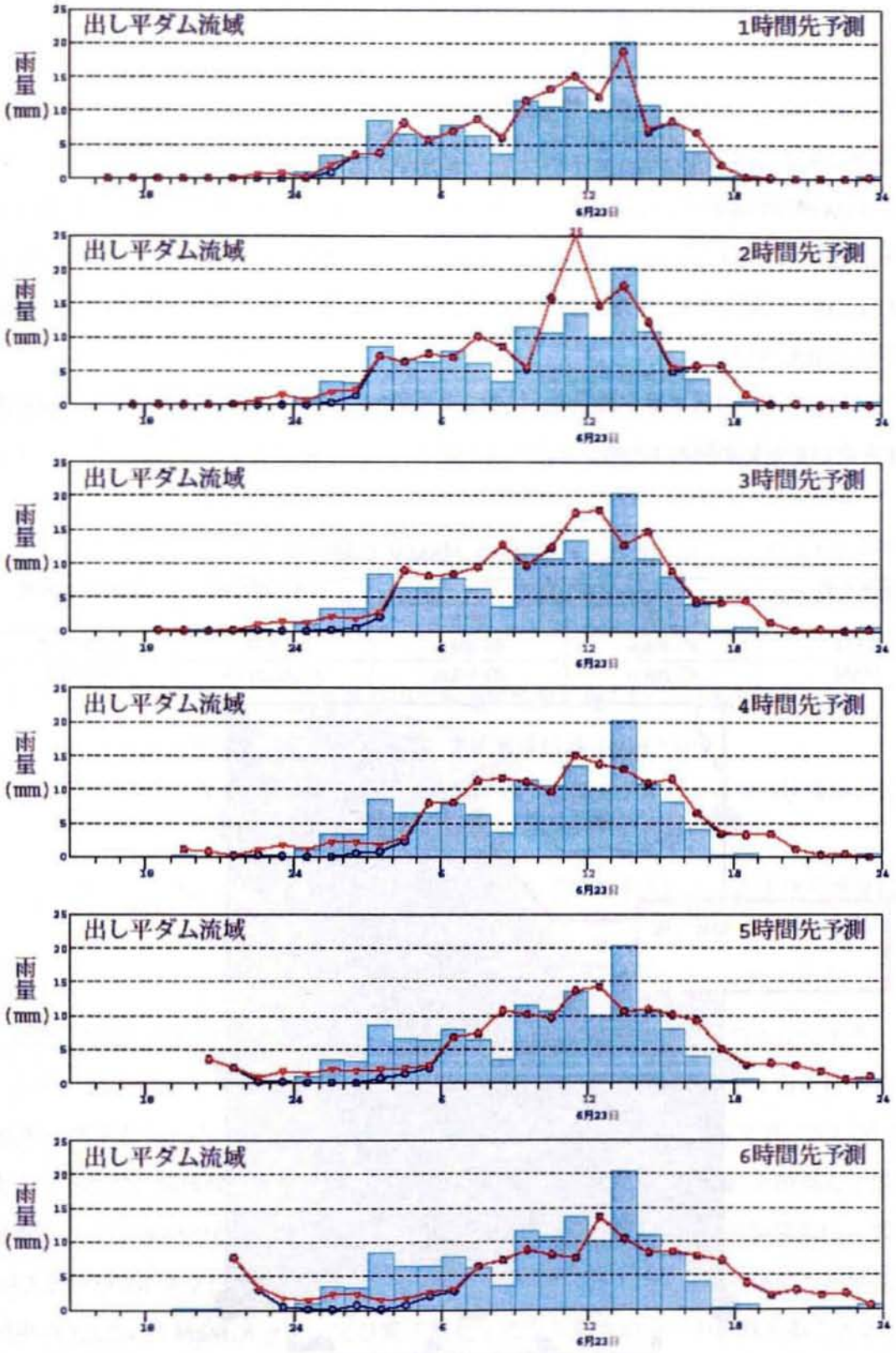


図-3.3.12　予測雨量と実況雨量の比較

（2000 年 6 月 22 日 16 時～23 日 24 時）

棒グラフ：実況　●：運動学的モデル 2004　▼：可降水量データ利用

３．３．２　気象庁最新プロダクトの活用による降雨予測手法の高度化

（１）MSM データの活用手法

ここでは気象庁 GPV のうち、MSM データの活用検討を行った。ハイブリッドモデル 2004 には、RSM が用いられているが、最近になって、空間分解能、更新頻度、配信遅れ時間のいずれの面でも RSM を上回る仕様をもつ MSM の配信が開始された。表-3.3.3 に RSM と MSM の仕様の比較を示す。また、図-3.3.13 に黒部峡谷周辺における RSM メッシュと MSM メッシュの比較を示す。

ここでは、ハイブリッドモデル 2004 を構成する運動学的モデル、物理的モデルの両方に MSM を用いるための検討を行う。

表-3.3.3　RSM と MSM の仕様比較

モデル名	空間分解能		予測初期時刻 (JST)	配信遅れ時間
	上空	地上		
RSM	約 40km	約 20km	9,21 時	約 6 時間
MSM	約 20km	約 10km	3,9,15,21 時	約 3 時間

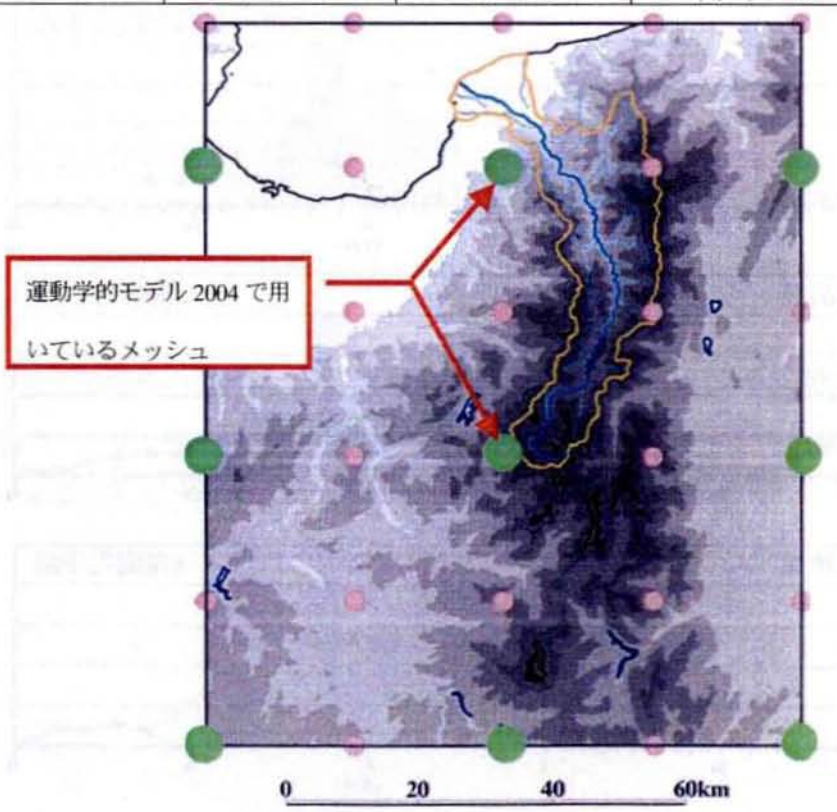


図-3.3.13　黒部峡谷周辺の上空の GPV メッシュ

（ ●：RSM&MSM　●：MSM ）

①運動学的モデルへの MSM データの導入

運動学的モデル 2004 では、図-3.2.9 に示す領域において、GPV（RSM）データを用いた降雨発達・発生特性を過去の事例解析をもとに設定している。MSM データを利用することによって、降雨発生・発達のパラメータを運動学的モデル 2004 の 2 倍の空間分解能で条件設定することは可能であるが、既存の成果を生かし、降雨発生・発達係数は、RSM の GPV の空間分解能で設定することとした。

MSM の GPV データを用いた降雨発生係数の計算方法は以下の通りである。

図-3.3.14 に示した黒部峡谷周辺の GPV （MSM）の 6 メッシュ各々について、700hPa 高度の水蒸気移流量が 150(g/kg・m/s)を超えた場合、降雨発生量 b を式（3.2.10）および式(3.2.11)によって算出し、6 メッシュのうち最も大きな b の値を、降雨発生係数とした。

$$b = R_{pot} \times R_{og} / R_{ogmax} \qquad (3.2.10)\text{（再掲）}$$

$$R_{pot} = \min\{0.04 \times (V_{adv} - 150),\ 10.0\} \qquad (3.2.11)\text{（再掲）}$$

ここに、

R_{pot}　：黒部峡谷内の降雨発生量の最大値 (mm/hour)

V_{adv}　：700hPa 高度の水蒸気移流量 (g/kg・m/s)

R_{og}　：各メッシュにおける、立平モデルによる地形性降雨の強度 (mm/hour)

R_{ogmax}　：降雨発生想定領域内の立平モデルによる最大地形性降雨量 (mm/hour)

また、MSM の GPV データを用いた降雨発達係数の計算方法は以下の通りである。

まず、図-3.3.14 に示した黒部峡谷周辺の GPV （MSM）の 6 メッシュ各々について、700hPa 高度と 500hPa 高度の相当温位、$\theta_e(700)$、$\theta_e(500)$を用いて、a を式（3.2.12）で算出する。次に、黒部峡谷内を、図-3.2.14 の黒丸および白丸に示すように上流域と下流域に分割し、上下流域それぞれの降雨発達係数を求める。上流域の降雨発達係数は、図中の 3,4,5,6 の MSM メッシュで計算された a のうち最大のものを、下流域の降雨発達係数は、図中の 1,2,3,4 の MSM メッシュで計算された a のうち最大のものを採用することとした。

$$a = \max\{10^{0.01 \times \{\theta e(700) - \theta e(500)\}},\ 1\} \qquad (3.2.12)\text{（再掲）}$$

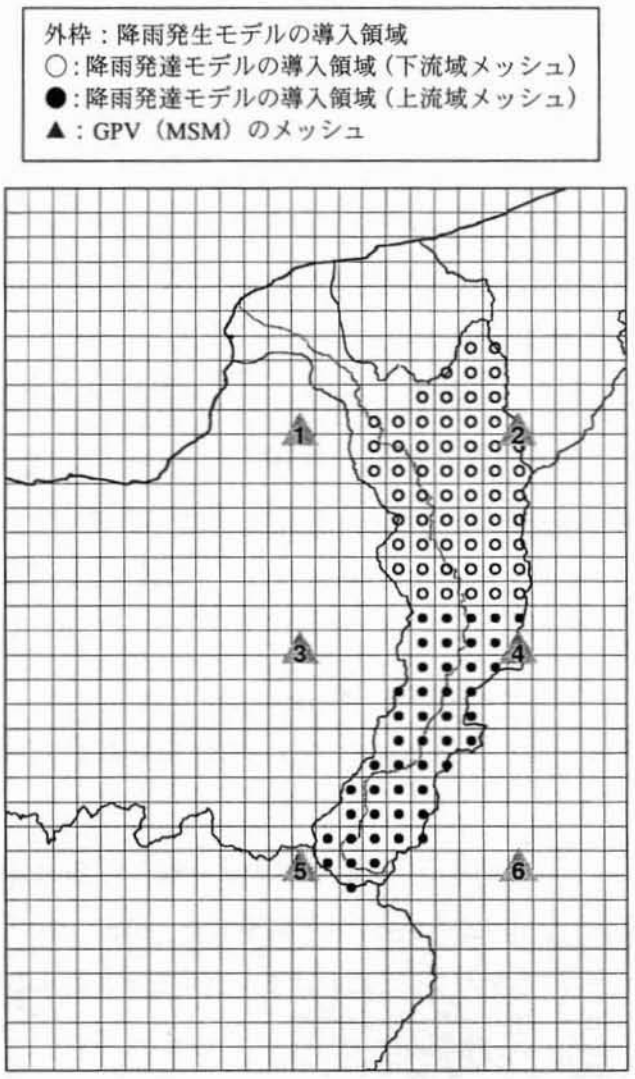


図-3.3.14　運動学的モデル 2005 の黒部峡谷周辺におけるモデルメッシュ

②物理的モデル 2004 への MSM データの導入

物理的モデル 2004 では、図-3.2.14 に示したように、GPV（RSM）データをもとに初期値・境界値を作成し、予測演算を行っている。GPV データの利用は、初期値・境界値の作成のみであるため、RSM データの利用を MSM データに置き換えても、物理モデル本体（＝同化手法を用いた局地気象モデル）の修正は不要であるため、RSM データを MSM データに置き換えることとした。

（2）ウィンドプロファイラの活用手法

ウィンドプロファイラは、図-2.2.6 に示したように全国 31 ヶ所の観測点において観測が行われている（2005 年 1 月末時点）。黒部峡谷の降雨予測へのデータ利用を考えた場合、

至近にある「福井」、「高田」の観測データの利用が有効であると考えられ、この２地点の観測データの分析を行った。検討の対象とした事例は、気象庁からウィンドプロファイラデータが配信されている2002年４月以降の事例である。

代表例として、図-3.3.15に2003年６月27日12時～６月28日17時の降雨事例、図-3.3.16に2004年７月17日６時～７月18日11時の降雨事例を示す。

これらの図より、以下のことがわかる。

①黒部峡谷周辺で大雨となる事例の典型例は、図-3.3.15 に見られるように、（やや南風成分を含んだ）西風場の中で立山の西側斜面にて発達した雨雲によって黒部峡谷内に降雨をもたらす場合である。このような典型的な事例の風の鉛直分布は、1999～2001年の梅雨期降雨集中観測によってドップラーレーダーによって観測された立山西側斜面で雨雲が発達・停滞する事例の風の鉛直分布と類似している（図-2.3.20 参照）。ドップラーレーダー観測によって得られる風の分布と比較すると、空間的に粗い情報ではあるが、黒部峡谷周辺で大雨となる場合の風のパターンが、ほぼリアルタイムに得られるようになったといえる。

②黒部峡谷内で豪雨となる事例では、大気が不安定になることによって黒部峡谷内で雨雲が急激に発達したと考えられ、図-3.3.16に見られるような（北風による）上空の寒気移流が寄与することがある。これは、２．２の解析結果から得られた、輪島の高層気象観測データから算出されたSSIが-2(K)未満であると黒部峡谷周辺で豪雨が発生しやすいという関係に加えて、風の状況も併せて黒部峡谷周辺の降雨発達をモデル化する必要性を示唆するものである。

これらの現象をモデル化するにあたっては、風の場のみではなく、水蒸気、気温の状態も考慮する必要があるため、ウィンドプロファイラデータとMSMデータを用いて、運動学モデル2004の降雨発生・発達パラメータの見直しを行うこととした。

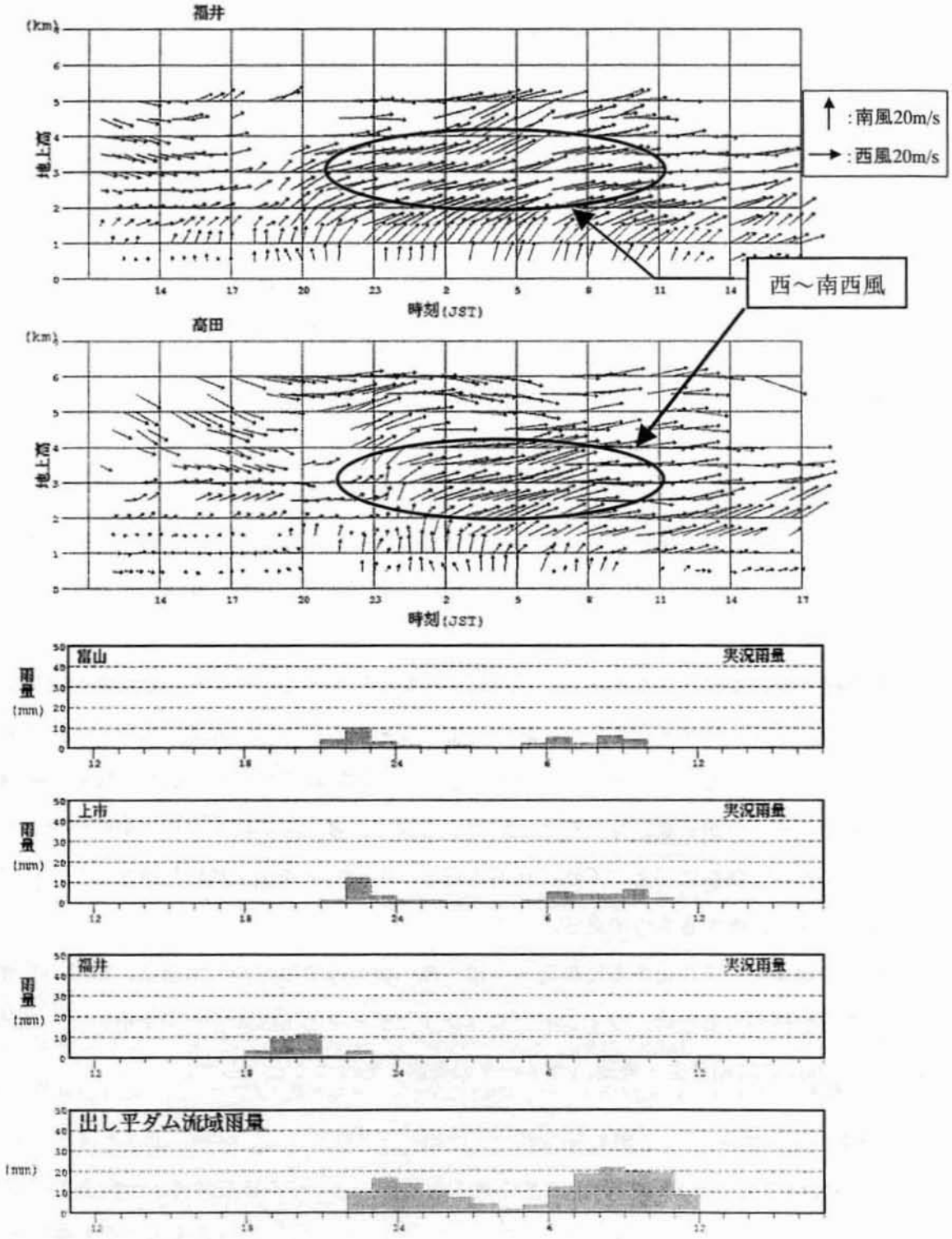


図-3.3.15　ウィンドプロファイラと地上雨量(1)

（　2003 年 6 月 27 日 12 時　～　6 月 28 日 17 時　）

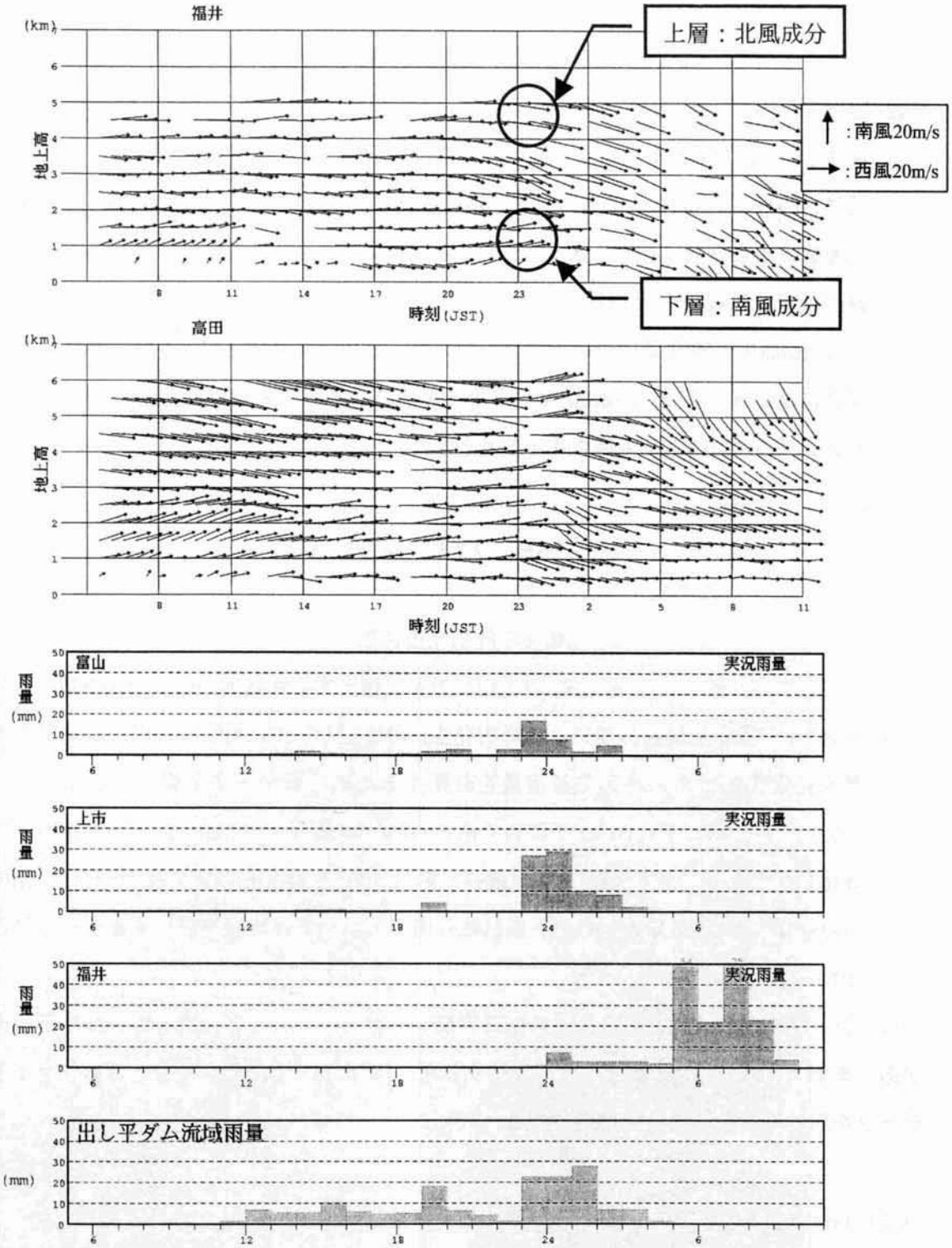


図-3.3.16　ウィンドプロファイラと地上雨量(2)

（ 2004 年 7 月 17 日 6 時　～　7 月 18 日 11 時 ）

ウィンドプロファイラデータと MSM データを用いた運動学的降雨予測手法の改良は、図-3.2.5 中に示した、⑤大気安定度による降雨発達（GPV データ利用）、および⑥水蒸気移流量による降雨発生（GPV データ利用）、の２項目を修正することによって行った。

1) 図-3.2.5 の⑤大気安定度による降雨発達、の修正として、黒部峡谷内における降雨発達は、GPV（MSM）による大気安定度に加えて、上空の寒気移流と下層の暖気移流を考慮することとした。上層の風データとしては「福井」、「高田」の 4,500～5,500(m)高度の南北風成分の平均値を、下層の風データとしては「福井」、「高田」の 500～1,500(m)高度の南北風成分の平均値を用いた。上空が北風であり、下層が南風である場合には、式(3.2.12)で MSM データから算出される降雨発達係数 a を増幅させるように、式(3.3.7)によって修正することとした。

$$a = 2 \times (a_0 - 1) + 1 \qquad (3.3.7)$$

ここに、

a：増幅後の降雨発達係数

a_0：式（3.2.12）の a に相当する増幅前の降雨発達係数

2) 図-3.2.5 の⑥水蒸気移流量による降雨発生、の修正として、黒部峡谷周辺の降雨発生量を推定するための水蒸気移流量を計算するための風データの変更を行った。式（3.2.11）における V_{adv} は、予測値である GPV（MSM）の 700hPa 風データを用いて算出していたが、実況値である「福井」の 2,500～3,500(m)高度の風データと GPV（MSM）の水蒸気量を用いて、黒部峡谷周辺の水蒸気移流量を算出するように修正を行った。

ウィンドプロファイラという上空の風の実況データを用いることによって、GPV データがあくまで「予測値」であるというデメリットを、「実況値」であるウィンドプロファイラデータを用いることによって回避できると考える。

（３）1km メッシュ合成レーダーデータの活用手法

2004 年 7 月から 1km メッシュの気象庁合成レーダーデータの配信が開始された。1km メッシュレーダーデータの、2.5ｋｍメッシュレーダーに対する優位性として、図-3.3.17 に示す空間分解能の細かさに加えて、図-3.3.18 に示す気象庁から配信されるデータの階級値ランクが大幅に多くなった点があげられる。

近年、局地的な集中豪雨が各地で頻発しており、黒部峡谷も急峻な山岳地形によって形

成されていることを考えると、集中豪雨の発生する可能性は高いと考えられる。局地的な集中豪雨では、2.5km メッシュレーダーのデータ階級区分では、十分に実現象を表現できない場合もあると考えられるため、1km メッシュ合成レーダーを利用する効果があると考えられる。

降雨予測モデルへの 1km メッシュ合成レーダーの導入においては、図-3.3.19 に示すように、従来の 2.5km メッシュに含まれる 9 個の 1km メッシュデータをそれぞれ含まれる面積に応じて加重平均した上で 2.5km メッシュデータに変換し、現行の降雨予測プログラムによる予測計算を行うこととする。

図-3.3.20 に 2.5km メッシュ合成レーダー、1km メッシュ合成レーダー、1km メッシュレーダーから変換した改良 2.5km メッシュ合成レーダーの分布図の比較を示す。図から、改良版 2.5km メッシュ合成レーダーでは、2.5km メッシュレーダーでは表現されていない、黒部峡谷内および周辺における強雨域をとらえていることがわかる。

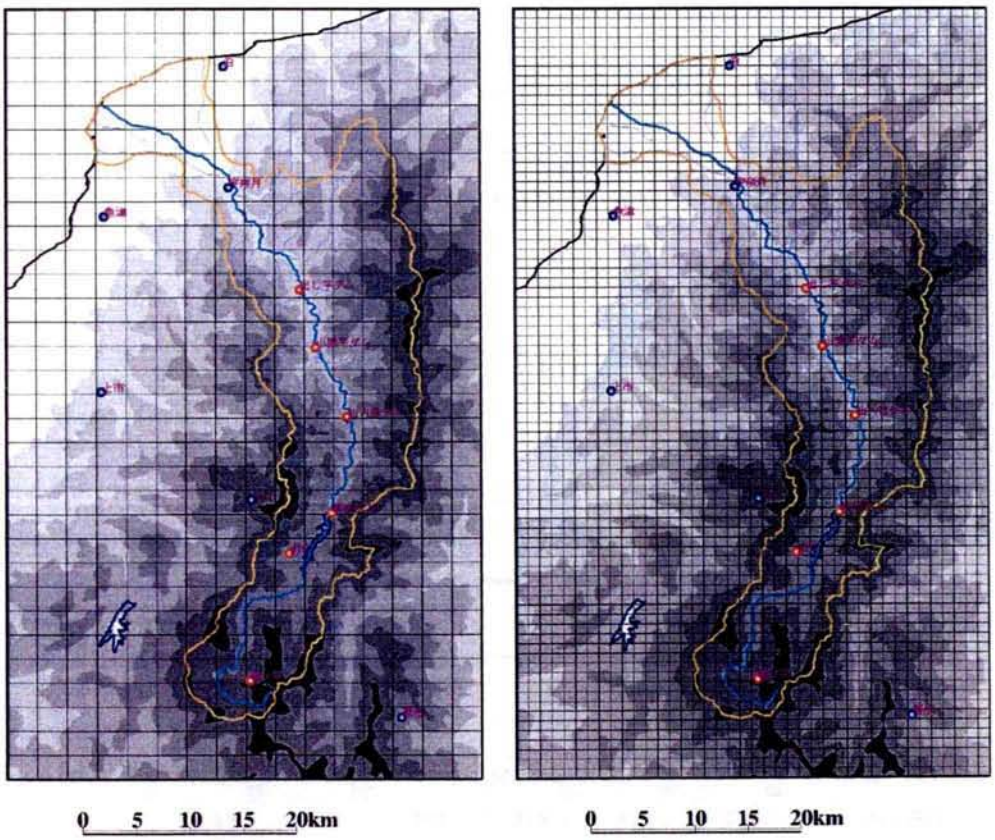


図-3.3.17　黒部峡谷周辺の気象庁合成レーダーのメッシュ

（左：2.5km メッシュ　右：1km メッシュ）

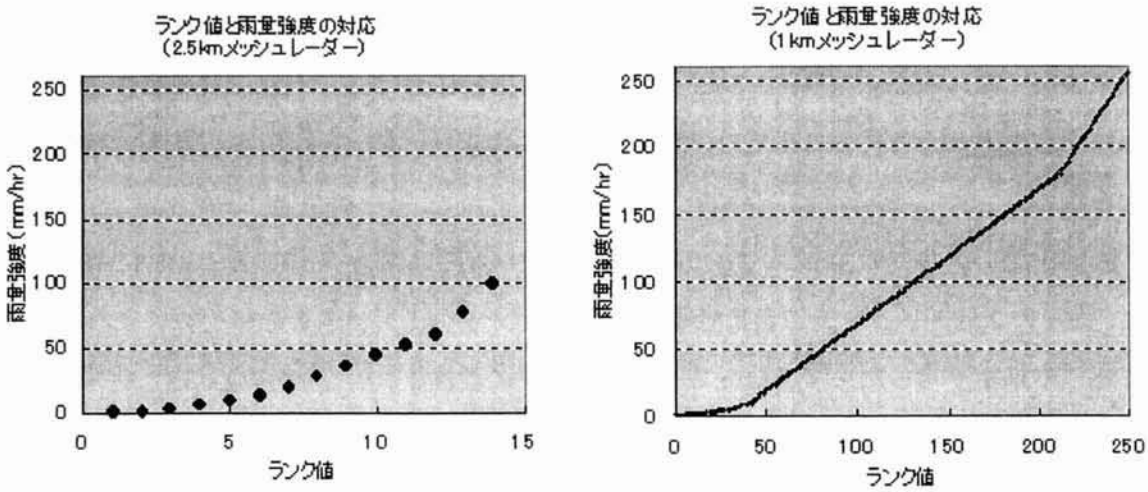


図-3.3.18　レーダーランク値と雨量強度の対応

（左：2.5km メッシュレーダー　右：1km メッシュレーダー）

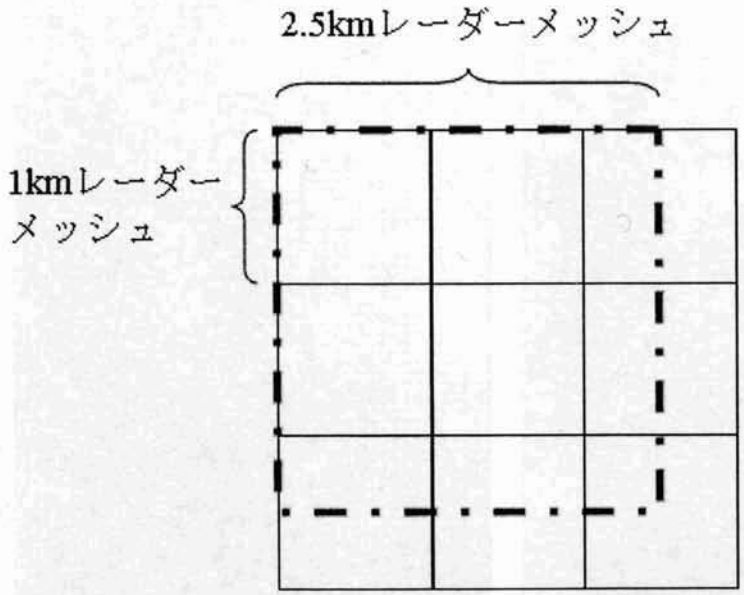


図-3.3.19　1km レーダーメッシュと 2.5km レーダーメッシュの配置の模式図

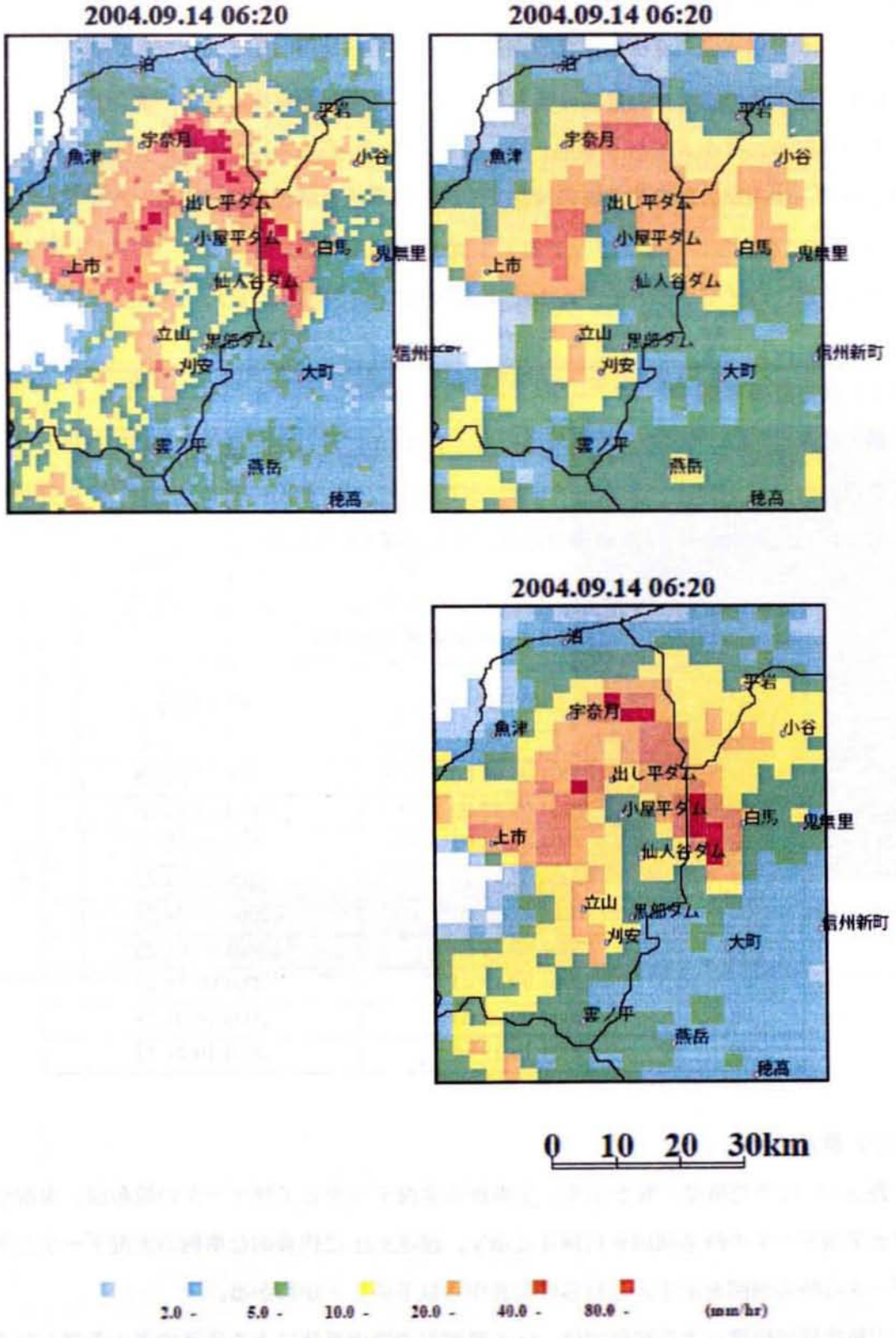


図-3.3.20　レーダー雨量分布図

上段左：1km メッシュ　　上段右：2.5km メッシュ

下段右：改良 2.5km メッシュ

３．３．３　精度検証

降雨予測手法の高度化の最新技術として、３．３．１で可降水量データ、３．３．２で気象庁最新プロダクトであるMSMデータ、ウィンドプロファイラおよび1kmメッシュ合成レーダーデータの活用手法を述べた。これらの手法を第２節で構築したハイブリッドモデル2004に導入し、ハイブリッドモデル2005を構築した。

ここでは、ハイブリッドモデル2005の精度について検証を行う。

（１）検証降雨事例

精度検証は2004年の生じた降雨のうち、表-3.3.4に示した9事例を用いて行った。

なお、1kmメッシュ合成レーダーデータについては、前述のとおり2004年7月からの配信のため、降雨番号6～9の事例に対してのみ導入している。

表-3.3.4　降雨事例（2004年）

降雨番号	開始日時	終了日時
01	2004.05.03 00	2004.05.05 23
02	2004.05.12 00	2004.05.15 00
03	2004.05.15 01	2004.05.18 23
04	2004.07.15 18	2004.07.18 23
05	2004.07.25 00	2004.07.26 23
06	2004.08.30 03	2004.09.01 23
07	2004.09.13 03	2004.09.15 23
08	2004.09.29 03	2004.10.01 23
09	2004.10.19 18	2004.10.21 23

（２）検証結果

表-3.3.5に予測精度一覧を示す。全事例の実況データと予測データの散布図、実況データと予測データの時系列図を付録４に示す。図-3.3.21に代表的な事例の実況データと予測データの時系列図を示す。これらの図表から以下のことがわかる。

①精度評価指標による評価では、4～6時間先の総雨量比による評価で過小予測となる問題はあるものの、それ以外は、ハイブリッドモデル2005の精度はハイブリッドモデル2004を上回る結果となっている。

②降雨番号 8、9 の事例では、ハイブリッドモデル 2005 による予測雨量は、ハイブリッドモデル 2004 による予測雨量と比較して、降雨の立ち上がりや全体的な降雨波形が実況雨量に近いものとなっている。

以上より、可降水量データおよび MSM データ、ウィンドプロファイラ、1km メッシュ合成レーダーデータといった気象庁最新プロダクトは、降雨予測手法の高度化に有効であることがわかった。

表-3.3.5　予測精度一覧（対象降雨事例：降雨番号 1～9）

評価指標	領域	黒部ダム　～　出し平ダム	
	予測時間	ハイブリッドモデル 2004	ハイブリッドモデル 2005
相関係数	1 時間先	**0.80**	**0.82**
	2 時間先	**0.62**	**0.64**
	3 時間先	**0.51**	**0.58**
	4 時間先	**0.46**	**0.55**
	5 時間先	**0.45**	**0.55**
	6 時間先	**0.38**	**0.54**
標準誤差（mm）	1 時間先	**2.56**	**2.37**
	2 時間先	**3.29**	**3.09**
	3 時間先	**3.73**	**3.35**
	4 時間先	**3.63**	**3.29**
	5 時間先	**3.59**	**3.29**
	6 時間先	**3.75**	**3.36**
総雨量比	1 時間先	**1.02**	**1.01**
	2 時間先	**1.05**	**0.99**
	3 時間先	**1.15**	**1.13**
	4 時間先	**0.96**	**0.88**
	5 時間先	**0.79**	**0.73**
	6 時間先	**0.67**	**0.60**

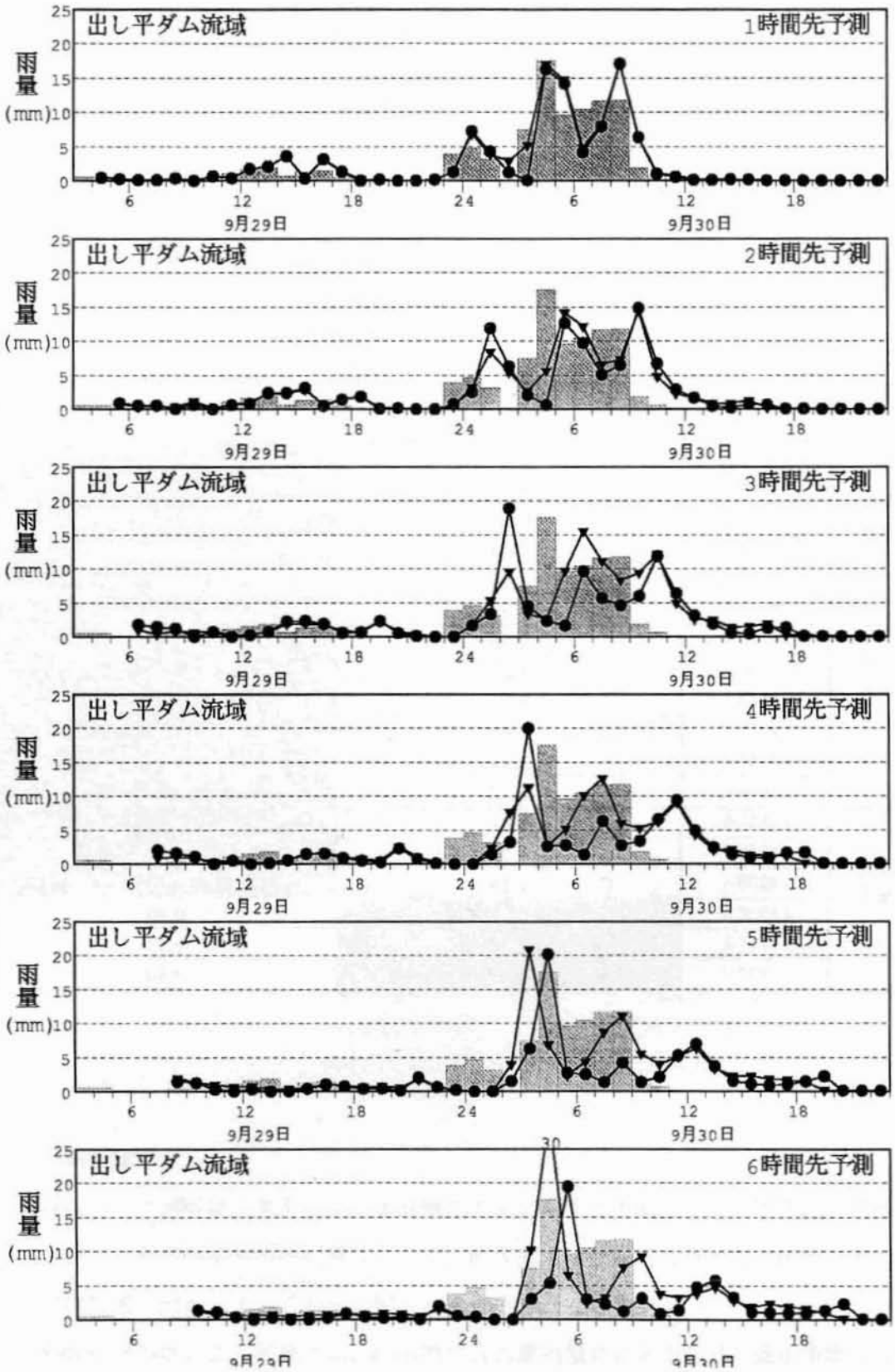


図-3.3.21(a)　予測雨量と実況雨量の比較（No.8：2004 年 9 月 29 日 4 時～30 日 23 時）

棒グラフ：実況　●：ハイブリッドモデル 2004　▼：ハイブリッドモデル 2005

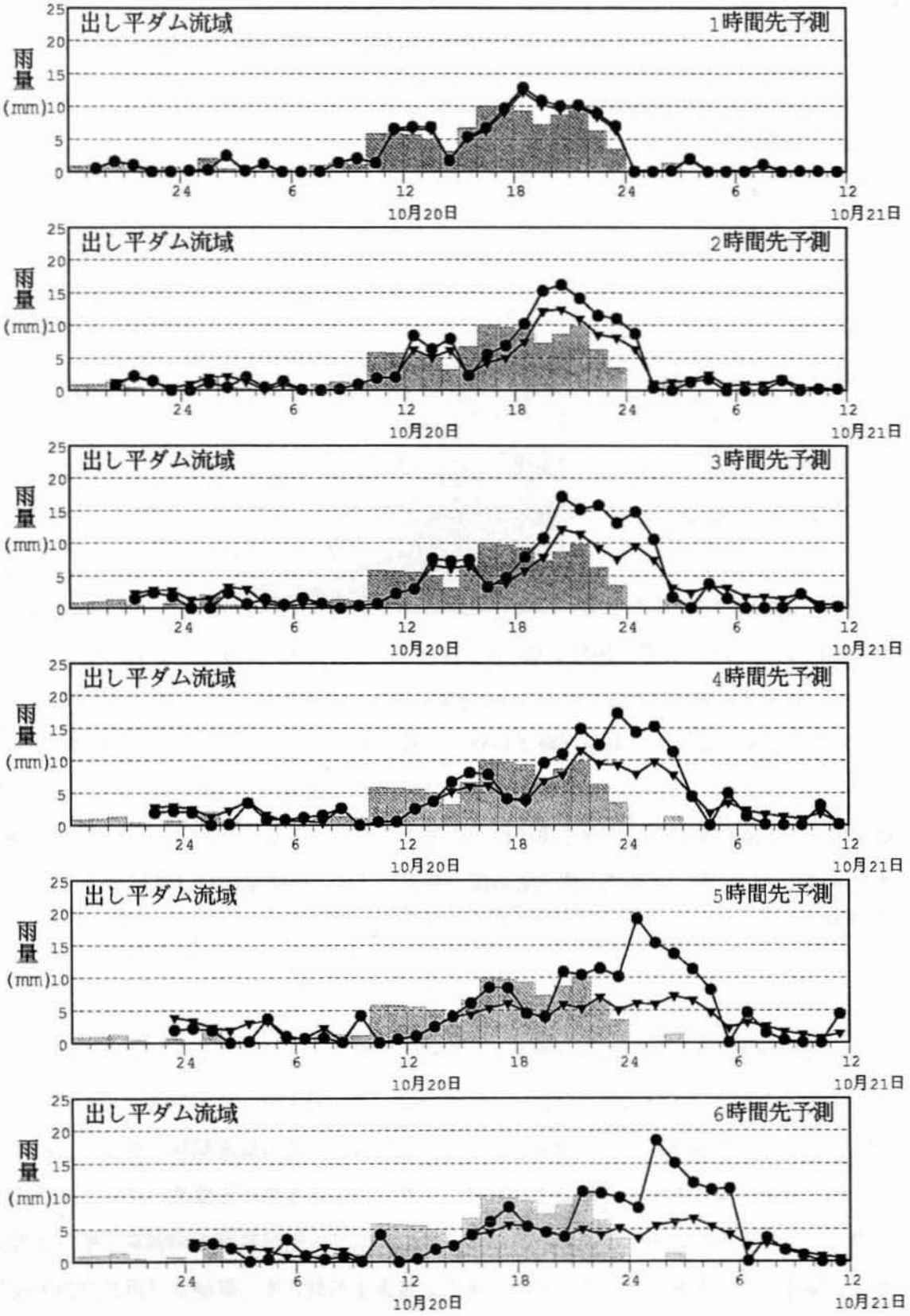


図-3.3.21(b)　予測雨量と実況雨量の比較（No.9：2004 年 10 月 19 日 19 時～21 日 12 時）

棒グラフ：実況　●：ハイブリッドモデル 2004　▼：ハイブリッドモデル 2005

（３）気象庁降水短時間予報との比較

つぎに、気象庁降水短時間予報との精度比較を行った。表-3.3.6 に予測精度一覧を示す。実況データと予測データの散布図、実況データと予測データの時系列図は付録４に示す。表-3.3.6 から以下のことがわかる。

①1 時間後を除き、相関係数、標準誤差いずれの評価指標による評価においても、ハイブリッドモデル 2005 による精度が気象庁降水短時間予報の精度を上回る結果となった。

②総雨量比による評価では、気象庁降水短時間予報では過小予測の傾向にあるが、ハイブリッドモデル 2005 ではこの問題点を回避できている.

以上のように 1 時間先予測については気象庁降水短時間予報に劣後するものの、ハイブリッドモデル 2005 の精度は総じて精度は良好であり、またダム管理面でリスクが高まる要因である雨量の過小評価についてもハイブリッドモデル 2005 は評価できるものと考える。

なお、実運用システムを考慮した場合、気象庁降水短時間予報は毎時 20 分～25 分頃に配信される。一方、本研究で開発したハイブリッドモデル 2005 は毎時 5 分頃に配信されるレーダー実況情報を受けた上で毎時 7～8 分頃には予測計算を終了し、予測データが利用可能な状況となる。従って、気象庁降水短時間予報のデータが配信される毎時 20 分～25 分のタイミングでは、ハイブリッドモデル 2005 による予測計算は、毎時 10 分のレーダー情報を用いた予測結果が利用できる優位性があることから、実運用上の精度としては、1 時間先予測においても、気象庁の降水短時間予報と同等以上の精度が期待できる。

表-3.3.6　予測精度一覧（対象降雨事例：降雨番号 1～9）

評価指標	領域	黒部ダム　～　出し平ダム	
	予測時間	ハイブリッドモデル 2005	気象庁降水短時間予報
相関係数	1 時間先	0.82	0.85
	2 時間先	0.64	0.56
	3 時間先	0.58	0.44
	4 時間先	0.55	0.42
	5 時間先	0.55	0.35
	6 時間先	0.54	0.38
標準誤差（mm）	1 時間先	2.37	2.09
	2 時間先	3.09	3.43
	3 時間先	3.35	3.65
	4 時間先	3.29	3.62
	5 時間先	3.29	3.86
	6 時間先	3.36	3.75
総雨量比	1 時間先	1.01	0.80
	2 時間先	0.99	0.73
	3 時間先	1.13	0.64
	4 時間先	0.88	0.58
	5 時間先	0.73	0.58
	6 時間先	0.60	0.55

３．３．４　まとめ

本節では、降雨予測に関する最新の技術として可降水量データおよび気象庁配信の最新データである MSM データ、ウィンドプロファイラ、1km メッシュ合成レーダーデータを取り上げ、これらを活用して予測精度を向上させる手法について述べ、その効果の検証を行った。得られた成果をまとめると次のとおりである。

まず可降水量データの活用による降雨予測手法の高度化に関して、富山平野において水蒸気ラジオメータにより可降水量の現地観測を行い、可降水量変動と降雨量の関係について考察した結果、可降水量は降水量の発生に先行して変動することが確認できた。つぎに地上気象データ、衛星データを用いた可降水量推定式を提案し、可降水量を用いた降雨予測開始指標を実時間で利用可能とした。これらの知見を前節で開発したハイブリッド降雨予測手法に活用した結果、ダム操作上重要な出水の立ち上がりを予測するのに重要な、降雨開始のタイミングおよび降雨量の予測精度に改善の効果があることが確認できた。

つぎに気象庁配信の最新データである MSM データ、ウィンドプロファイラ、1km メッ

シュ合成レーダーデータの活用手法を具体的に提案した。可降水量の活用も含め、予測精度の精度検証を行った結果、これらを活用することにより精度は向上することを確認した。このことにより、可降水量データおよび気象庁最新プロダクトである MSM データ、ウィンドプロファイラ、1km メッシュ合成レーダーデータは、ハイブリッド降雨予測手法の高度化に有効であると考える。

３．４　結語

本章では、急峻な山岳域における降雨予測手法の開発と高度化について論じた。

まず、各種の降雨予測手法について整理した後、運動学的手法に黒部渓谷特有の降雨停滞特性や降雨発達特性などを考慮する運動学的予測モデルを開発した。1～6時間先までの最適な降雨予測のため、この運動学的手法に水蒸気量が逐次修正される同化手法を適用した物理的手法を最適に合成させる手法を開発した。その結果、予測降雨分布と実況雨量分布との比較、気象庁降水短時間予報および開発手法での予測雨量の時系列による比較および各種精度指標による比較より、開発したハイブリッド降雨予測モデルは気象庁での予測結果と比べ優れた精度を有し、また実用的な精度が確保できるとの結論を得た。

つぎに、降雨予測に関する最新の技術として可降水量データおよび気象庁配信の最新データであるMSMデータ、ウインドプロファイラ、1kmメッシュ合成レーダーデータを取り上げ、これらを活用して予測精度を向上させる手法について述べ、その効果の検証を行った。その結果、まず可降水量データの活用による降雨予測手法の高度化に関して、富山平野において水蒸気ラジオメータにより可降水量の現地観測を行い、可降水量変動と降雨量の関係について考察した結果、可降水量は降雨の発生に先行して変動することが確認できた。つぎに地上気象データ、気象衛星データを用いた可降水量推定式を提案し、可降水量を用いた降雨予測開始指標を実時間で利用可能とした。これらの知見を前節で開発したハイブリッド降雨予測モデルに適用した結果、ダム操作上重要な出水の立ち上がりを予測するのに重要な、降雨開始のタイミングおよび降雨量の予測精度に改善の効果があることが確認できた。さらに、気象庁配信の最新データであるMSMデータ、ウインドプロファイラ、1kmメッシュ合成レーダーデータの活用手法を具体的に提案し、可降水量の活用も含めて、ハイブリッド降雨予測モデルに適用した結果、予測精度が向上することを確認できた。以上により、可降水量データおよび気象庁最新プロダクトであるMSMデータ、ウィンドプロファイラ、1kmメッシュ合成レーダーデータは、ハイブリッド降雨予測モデルの高度化に有効であるとの結論を得た。

第３章　参考文献

1) 立平良三，牧野義久：デジタル化されたエコーパターンの予測への利用，研究時報，Vol. 26，pp. 188-199，1974.

2) Wilk, K. E. and Gray, K. C. :Processing and Analysis Techniques Used with the NSSL Weather Rader System, Proc. 14th Rader Met. Conf., pp. 369-374, 1970.

3) Austin, G, L. and Bellon, A.: The Use of Digital Weather Record for Short-Term Precipitaion Forecasting, Q. J. R. Met. Soc., Vol. 100, pp. 658-664, 1974.

4) 大倉 博，石崎勝義，中尾宏臣，森本陸世：レーダ雨量計を用いた短時間降雨予測，第27回水理講演会論文集，pp. 349-354，1983.

5) 高棹琢馬，椎葉充晴，中北英一：レーダー雨量計による短時間降雨予測の検討，京都大学防災研究所年報，第26号B-2，pp.165-180，1983.

6) 竹内邦良：雨域，雨量強度分布変化の短時間予測，第 22 回水理講演会論文集，pp. 161-168，1978.

7) 椎葉充晴，高棹琢馬，中北英一：移流モデルによる短時間降雨予測の検討，第28回水理講演会論文集，pp. 349-354，1984.

8) Takasao, T. and Shiiba, M. : Development of techniques for on-line forecasting of rainfall and runoff , Natural Disaster Science, 6, No.2, pp. 83-112, 1985.

9) 森山聡之，平野宗夫，河原田寿紀：移流拡散モデルによる短時間降雨予測，第29回水理講演会論文集，pp. 209-214，1985.

10) 河村 明，神野健二，Niemczynowicz, J.，Berndtsson, L.，Larson, M.：短時間都市規模地上降雨の時空間特性と実時間予測について，水工学論文集，第35巻，pp. 63-68，1991.

11) 下垣 久，宝田 明，江藤剛治：雨量観測データによる降雨分布の解析とそのオンライン予測，第22回水理講演会論文集，pp. 169-174，1978.

12) 日野幹雄：‘仮想荷重法’による降雨の短時間予測，第 29 回水理講演会論文集，pp. 203-208，1985.

13) Kojiri, T., Nishimura, S. and Fujiyoshi, Y. : Prediction of snowfall with Doppler rader data and neural networks, Proc. of Ⅲ Int. Symp. on Hydrological Applications of Weather Rader , San Paulo , Brazil , pp. 467-466, 1995.

14) 吉野文雄，水野雅光，喰 朝夫：雨域追跡法による短時間降雨予測の精度，第 31 回水

理講演会論文集, 土木学会, pp. 209-214, 1987.

15) 日本気象学会：気象科学事典，pp.268，1998.

16) 中北英一，椎葉充晴，池淵周一，高棹琢馬：3 次元レーダーを利用した降雨予測手法の開発，水工学論文集，第 34 巻，土木学会, pp. 91-96, 1990.

17) Nakakita, E., Shiiba, M.,Ikebuchi, S. and Takasao, T.: Advanced Use into Rainfall Prediction of Three-dimensionally Scanning Rader, Stochastic Hydrology and Hydraulics, 4, pp. 135-150, 1990.

18) Nakakita, E., IKebuchi, S., Sawada, N., Shiba, M. and Takasao, T.: A Short-term Rainfall Prediction Method Using Reflectivity Detected by Three-dimensionally Scanning Rader, Proc. of 2nd Int .Symp . on Hydrological Application of Weather Rader (to be published in a conference book), F1(10pages), 1992.

19) 中北英一，杉本総一郎，池淵周一，中村徹立，奥田昌弘，山路昭彦，高棹琢馬：3 次元レーダーおよび GPV データを用いた短時間降雨予測手法，水工学論文集，第 40 巻，土木学会, pp. 303-308, 1996.

20) Nakakita,E., Ikebuchi,S., Nakamura,T., Kanmuri, M., Okuda, M., Yamaji, A . and Takasao, T. : Short-term Rainfall Prediction Method Using a Volume Scanning Rader and GPV data from Numerical Weather Prediction, Journal of Geophysical Research , Vol. 101, No . D21, pp. 26, 181- 26, 197, 1996.

21) 橋本徳昭，高田 望，片岡幸毅，池淵周一：山岳域の電力ダムを対象とした降雨予測手法の実用化，ダム工学，Vol.16，No.4，2007.（掲載予定）

22) 森本　浩：ダム流域を対象とした降雨予測手法の開発研究, 第 53 回電力気象全国大会, 1997.

23) 例えば、気象庁編：新しい数値解析予報システム，数値予報課報告・別冊第 47 号，2000.

24) Doswell, C.A. : Short range Forecasting, Mesoscale Meteolology and Forecasting, pp.689-719,1986.

25) 片岡幸毅，大東秀光，角田 恵，池淵周一，中北英一，大石 哲，藤田 暁，高田　望：山岳域の気象，降雨特性に関する実験的研究，水工学論文集，第 44 巻，土木学会，pp.103-108，2000.

26) Hashimoto, N. and Kataoka, K.: Development of a system for operating the spillway gate for hydroelectric dams, Proc. of ICOLD －69th Annual Meeting Dresden, Vol.I, pp.293-313, 2001.

27) 橋本徳昭，片岡幸毅：電力ダムの洪水吐ゲート操作に関するシステム開発，大ダム，No.177，pp.65-75，2001.

28) 片岡幸毅，安岡恒人，小久保鉄也，高田 望：急峻な山岳域を対象とした短時間降雨予測手法の開発，電力土木，No.316，pp1-5，2005.

29) 立平良三：雨滴の成長を考慮した地形性降雨の計算，天気，Vol.23，No.2，pp.27-32，1976.

30) 日本気象協会：沿岸・内湾での海霧予測の実用化研究（その２）報告書，日本財団助成平成14年度報告書(http://nippon.zaidan.info/seikabutsu/2001/00282/contents/00007.htm)，2003.

31) Takada, N., Masuda, A., Tsujimoto, H., Okuda, M., and Takeuchi, Y.:A Short-term Rainfall Forecast using a Numerical Model Assimilated by the Radar Data, Proc. of Fifth International symposium on Hydrological Applications of Weather Radar, pp.359-364, 2001.

32) 橋本徳昭，高田 望，大石 哲：実運用降雨予測システムの高度化に向けた新たな可降水量推定手法の開発，水工学論文集，第50巻，pp.397-402，2006.

33) 神田 学，石田知礼，鹿島正彦，大石 哲：首都圏における雷雨性集中豪雨とGPS可降水量の時空間変動 -1997年8月23日の集中豪雨の事例解析-, 天気, Vol.47 No.1, pp.7-15, 2000.

34) Gendt, G., Dick, G., Reigber, C., Tomassini, M., Liu, Y. and Ramatschi, M. :Near Real Time GPS Water Vapor Monitoring for Numerical Weather Prediction in Germany, Journal of Meteorological Society of Japan, Vol.82, No1B, pp.361-370, 2004.

35) http://dbx.cr.chiba-u.jp/Gps_Met/GpsHome_j.html

36) 大谷 竜，辻 宏道，萬納寺信崇，瀬川爾郎，内藤勲夫：国土地理院GPS観測網から推定された可降水量，天気，Vol.44，pp.317-325，1997.

第４章　ダム流域からの降雨流出量の予測技術に関する研究

４．１　概説

本章では、前章までに述べた降雨予測を用いて、ダムへの流入量を予測する手法[1),2),3)]について検討する。

雨量レーダーの整備に伴い、ダムでは、流域内の降雨の空間的な分布状況を、数 km の格子のメッシュデータの形でリアルタイムに受信できるようになっている。また、前章で取り扱ったように、現在時刻以降の予測雨量についても、同じくメッシュデータの形で出力される。

ダムの流入量を予測するに際しては、このような、雨量の空間的な分布状況の情報を活かし、例えば流域内のある地点に集中して降雨があった場合の流出や、雨域が移動していく場合の流出を適切に計算することが必要である。このため、上述のようなメッシュ雨量データを、流水の物理を考慮した分布型の流出モデルに入力し、河川流量を計算するという方法を基本に考える。

一方、河川の流量を実時間で予測する場合、観測により得られる時々刻々の流量の値を計算にどのようにフィードバックするかが、予測精度向上の大きな鍵となる。一般に、流出モデルにカルマンフィルタを適用してフィードバックの計算を行うのが有効な手法として認められているが、分布型の流出モデルでは、取り扱う変数が膨大な個数になり、観測値を適切にフィードバックすることが容易ではない。また、分布型の流出モデルは一般に長い計算時間を要することから、実現象よりも充分速い計算スピードが要求される実時間流量予測には、これまで一般に用いられていない。

そこで、従来、降雨の分布を考慮してリアルタイムの流出予測を行う必要があるような流域では、貯留関数法などの簡便な集中型モデルを部分流域ごとに作成して、それらの計算によってその流域の流出を計算するという方法が一般的に用いられている。

これら貯留関数法などの集中型流出モデルは、流域の出口における流量の計算値と観測値が合うことを第一に目指して作られているので、よい流量再現性を見せる。しかし、その物理的根拠は弱く、部分流域ごとに流域特性を正確に反映したモデルを用意するのは実際には難しいと考えられる。

一方、物理的な分布型モデルは、流域出口における流量の適合だけでなく、流域内部の水理状態の再現も重要視されるので、必ずしも集中型モデルより優れた流量再現性を見せ

るとは限らないが、実時間の流出予測においては、観測した流量を逐次取り込んでモデルの計算を補正することができれば、降雨だけを入力として行う流出解析に比べて、かなりよい計算結果が得られると考える。

物理的な分布型流出による実時間流出予測を実現するため、本研究では対象流域を部分流域に分割し、部分流域ごとに物理的な流出モデルを一部集中化することにより、カルマンフィルタによる実測流入量のフィードバックを行い、かつ、実用的に十分速い計算スピードを持つ、予測システムを構築する。

本章では、第２節で従来の流量予測について概観した後、第３節において本研究で構築するダム流入量予測システムの計算方法を述べ、第４節で、その計算方法による流出予測シミュレーションの結果とその精度について説明する。

４．２　従来の流出予測に関する研究

４．２．１　流出予測に関する従来の研究

実時間で河川の流出予測をする手法は、流出モデルにより流出計算を行う方法、上流の河川流量や雨量から回帰式により予測する方法の他、近年は、上流の河川流量や雨量から、ニューラルネットワーク[4),5)]、ファジィ理論[6)]、パターン認識[7,8)]、遺伝的アルゴリズム[9),10)]の手法等を用いて予測する方法も、多く研究されている。

こうした様々な手法のうち、実際の流出予測に有効であり、実用性が高いことが一般に認められている手法として、流出モデルにカルマンフィルタの理論を組み合わせて流出予測を行う手法が挙げられる。これは、流出モデルにより雨量から河川流量の計算を行うと同時に、河川で実際に計測される河川流量データを用いて、流出計算の内部の状態を修正するものである。これにより、流出計算と実測の河川流量との整合性を持続させることができ、精度の高い流入量予測を行うことができる。

水理公式集例題プログラム集[11)]において、貯留関数法モデルおよびタンクモデルに対しカルマンフィルタを適用する方法が取り上げられているほか、永井ら[12)]はタンクモデルを改良した流出モデルにカルマンフィルタを適用してダム流入量予測を行う方法を紹介している。また、北海道河川防災研究センターも、カルマンフィルタと流出モデルを組み合わせた洪水予測手法を、プログラムソース付きで詳しく解説している[13)]。

しかし、こうしたカルマンフィルタによる流出予測が、ダム流入量予測や河川水位予測の現場においてどの程度実用システム化されているかについては、報告事例[14)]がほとんど無く、詳細については不明である。

2002 年に河川情報センターが作成した「中小河川における洪水予測の手引き[15)]」では、上流地点水位や上流域雨量から回帰式により予測する方法とともに、流出モデルによる洪水予測方法が示されている。しかし、流出モデルにカルマンフィルタを適用する手法は取り上げず、実測の流量から貯留関数法の貯留高や流出率定数 K などを単純に逆算し、それをスタートにして将来時刻の計算をするという方法がとられている。

カルマンフィルタは、貯留関数法のような単純なモデルと組み合わせて用いられる場合、計算機への負担は軽く、また、計算の安定性も悪くないが、理論を把握するのに若干時間を要する面があることから、上記の手引きでは取り上げられておらず、より簡便な方法が取り上げられているものと思われる。そして、ダム流入量予測や河川水位予測の現場にお

いて実用化されているシステムについても、こうした簡便な手法のものが多いようである。

一方、流出解析における分布型の計算の必要性は、従来から盛んに指摘されている。実時間で流出解析を行うダム流入量予測においても、分布型流出モデルにより流域内の降雨分布や複雑な地形の影響を適切に反映した流出計算を行うことは、意義が大きい。

しかし、第１節に述べたとおり、観測値を適切にフィードバックすることが容易ではないこと、分布型の流出モデルは一般に長い計算時間を要すること等から、分布型流出モデルを実時間の河川流量予測に適用し、また、その実用化システムを構築しようとする試みは、まだ少ないのが現状であるといえる。

こうした中、藤田ら[16]は、物理的な分布型流出モデルとして、高棹ら[17]により開発された「河道網集中型 kinematic wave モデル」を用い、これにカルマンフィルタを適用することにより、洪水時にリアルタイムで計算を行うことのできる手法を提案している。

また、Kim ら[18]は、市川ら[19]の山腹斜面流出系における一般的な流量流積関係式の集中化の手法を用い、落水線における詳細な流れの計算を、実測流量データ取得時だけ一時的に集中化し、カルマンフィルタを適用するという手法を提案している。

これらの計算を行う計算機の能力は、近年飛躍的に向上しており、また、ダム管理の現場においてはメッシュ形式の雨量データ等、各種データがリアルタイムで取得できる環境が整備されてきている。このため、上述のような物理的な分布型流出モデルをリアルタイムで用いる方法を、実用のシステムとして利用することが、今まさに待たれているといえる。

４．２．２　分布型流出モデルに関する従来の研究

分布型の流出モデルは、様々な研究者により、種々のモデルが考案されている。

現在、実用という観点から見て最も広く用いられているのは、等価粗度法[20]である。等価粗度法では、図-4.2.1 のように、流域を矩形で表現する。モデルは斜面と河道から成っており、斜面・河道ともに、Manning 則を適用した kinamatic wave 式に基づいて流れの計算を行う。このうち斜面の流れの計算で用いられる粗度係数は、土地利用条件ごとに標準的な値が求められており、その値は通常の水理学等で用いられる粗度係数に比べ大きい数値であるため、特に等価粗度と呼ばれている。斜面および河道の kinematic wave 式の解法として、特性曲線法が多く用いられるため、この流出モデル自体を特性曲線法と呼んでいる場合もある。通常、斜面では Manning 則による表面流のみを計算するが、これに加え、中間流等

を考慮する場合もある。また、河道の計算は kinematic wave 式でなく、dynamic wave 式を適用する場合もある。

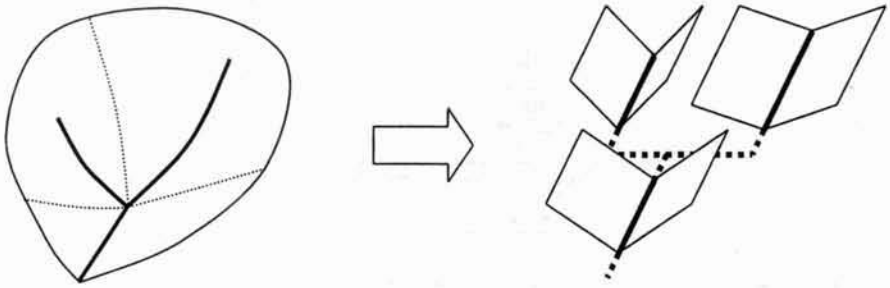


図-4.2.1　等価粗度法における流域のモデル化

上記以外に、近年、比較的多く実用に用いられているモデルとして、図-4.2.2 に示す小尻らのモデル[21]、図-4.2.3 に示す土木研究所の WEP（Water and Energy transfer Process）モデル[22]等を挙げることができる。

これらのモデルは、流域を格子状のメッシュで覆い、各メッシュ毎に数段のタンクを置くという形が基本になっている。水平方向の水の動きは落水線に沿って生じるものとし、表層における Manning 則の流れ、および、下層のタンクにおける中間流や地下水流に相当する流れを計算する。これらのモデルの特徴として、水田の効果や工業用水等の水利用も考慮され、洪水時の流出だけでなく低水の流出についても良い再現性を持たせてあり、また、水の流量の解析だけでなく水質の解析も合わせて行うことが多いということが挙げられる。

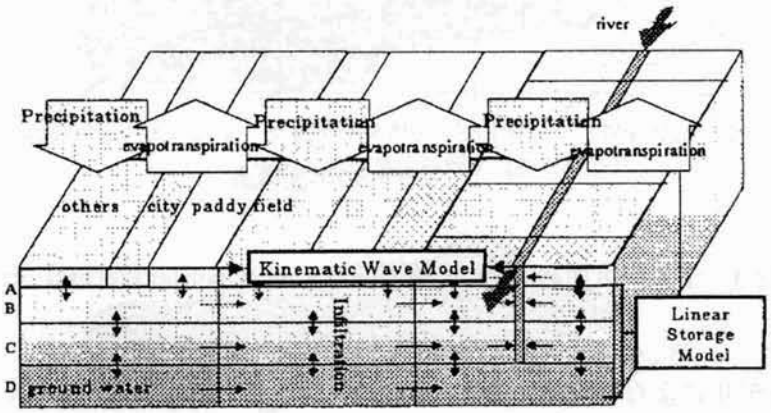
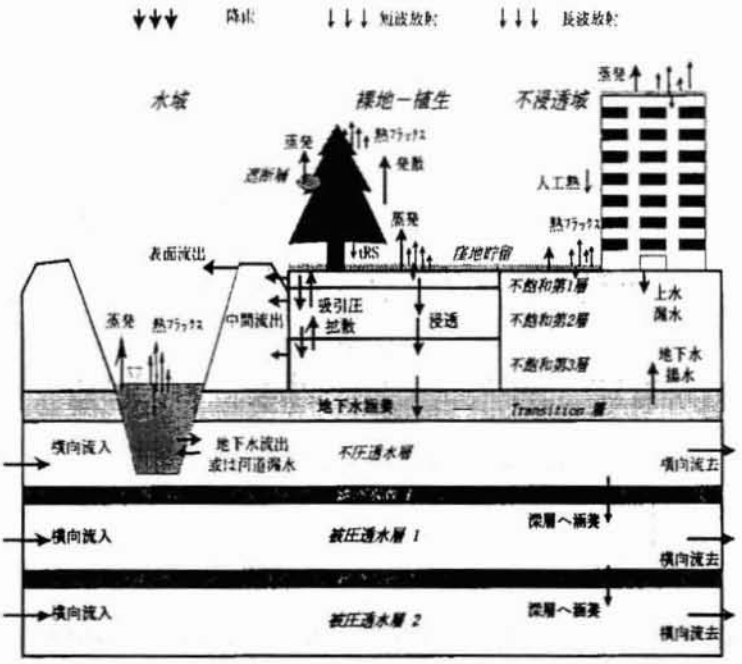
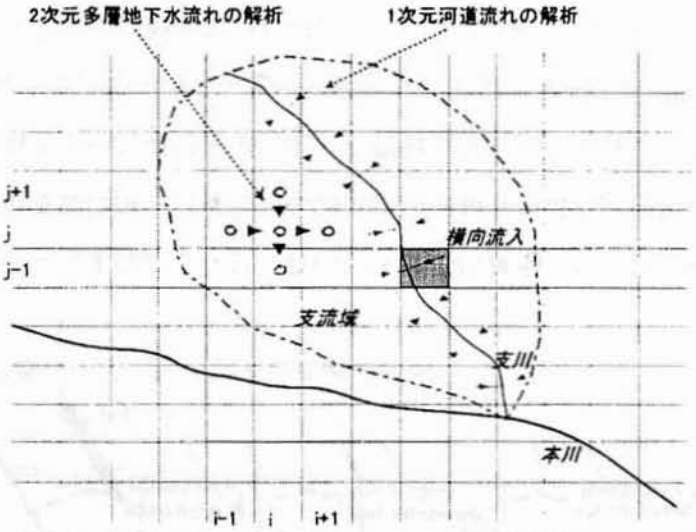


図-4.2.2　小尻らのモデル[21]



モデルの鉛直構造



モデルの平面構造

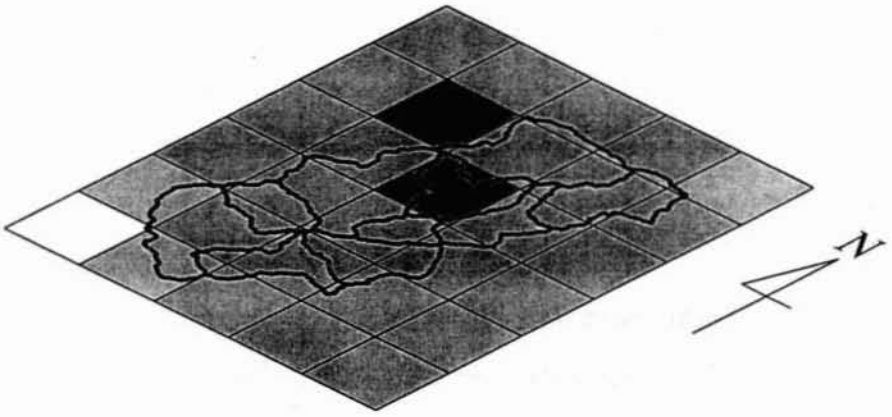
図-4.2.3　土木研究所の WEP（Water and Energy transfer Process）モデル [22)]

これらのモデルにより、近年、分布型流出モデルは、流域の水循環や、物質循環を解析するツールとしての利用が多くなっているが、物理的な分布型流出モデルをリアルタイムで稼働させる試みはあまりなされていないのが現状である。

４．３　分布型流出モデルに基づく実時間流入量予測モデルの構築

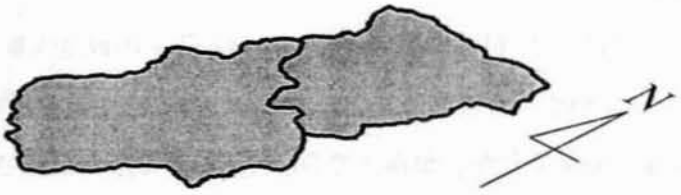
本研究では、流出現象を山腹斜面における流出と河道における流れに分けて考える。対象流域を部分流域に分割し、各部分流域を単位として、斜面のモデルと河道のモデルを適用する。対象流域を部分流域に分割する際、図-4.3.1 に示すように、部分流域の大きさを雨量データのメッシュサイズと同程度かそれ以下の大きさにすることにより、メッシュ形式の雨量データが持つ降雨の分布情報を活かすことができる。

以下では、本研究で用いる斜面のモデルと河道のモデルについて詳述する。また、それらに付随して、システムに導入した、有効降雨の算定方法および融雪成分の考慮方法について述べる。



(a)　雨量のメッシュ
（メッシュの濃度は、降雨強度を表す）

(b)　部分流域の大きさを、雨量データのメッシュサイズと同程度にした場合
（メッシュデータの雨量の強弱が反映される）



(c)　部分流域の大きさが、雨量データのメッシュサイズより大きい場合
（メッシュデータの雨量の強弱が失われる）

図-4.3.1　雨量のメッシュサイズと部分流域の大きさに関する模式図

４．３．１　斜面の流出モデル

斜面の流出計算は、市川ら[19]の「集中化された表面流・中間流統合型 kinematic wave モデル」を用いる。

これは、まず、対象流域において詳細な地形モデルを作成し、また、その地形モデル上で表面流・中間流統合型の kinematic wave[22]の計算を行う詳細なモデルを構成したうえで、その詳細なモデルの流出特性を抽出し、単純な集中化モデルを構築するものである。

詳細な流出モデルは計算に時間を要するが、それを集中化したモデルを構築することにより、実時間での利用がしやすい、計算時間の短いモデルを実現できる。

以下では、まず、一般的な山腹斜面の kinematic wave モデル、および、表面流・中間流統合型の kinematic wave モデルについて述べ、続いて市川らの集中化手法について述べる。

さらに、流出シミュレーションを行い、詳細な地形モデル上で表面流・中間流統合型 kinematic wave による詳細な計算を行った場合の計算結果と、それを集中化したモデルによる計算結果を比較する。

（１）山腹斜面における kinematic wave モデル

斜面における最も基本的な kinematic wave モデルは、次式で表されるものである。

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial q}{\partial x}=r \tag{4.3.1}$$

$$q=\alpha h^{m} \tag{4.3.2}$$

ここに、t：時間（sec）、x：斜面上端からの距離（m）、h：水深（m）、r：降雨強度（m/sec）、q：単位幅流量（m^2/sec）、α, m：定数である。

定数α、m は、Manning 則を用いると、

$$\alpha=\sqrt{\sin\theta / n} \tag{4.3.3}$$

$$m=5/3 \tag{4.3.4}$$

で与えられる。ここに、θ：斜面勾配（rad）、n：Manning の粗度係数（m-sec）である。

式(4.3.1)と式(4.3.2)からなる偏微分方程式は、特性曲線法や差分法を用いて解かれ、斜面下端からの流出量の時間変化や、斜面上での水の流れの様子が計算される。

式(4.3.2)は、単位幅あたりの流量と流積（＝水深）の関係を表しており、式(4.3.3)、式(4.3.4)で示されるα、m を適用した場合、Manning 則に従う地表面の流れを表すこととなる。

（２）表面流・中間流統合型 kinematic wave モデル [22)]

（１）の kinematic wave では、Manning 則に従う表面流だけを扱うのに対し、山腹斜面においては、山腹斜面の透水性の高い表土層中を流れる中間流が卓越し、また、その表土層が水で飽和したときにおいて、中間流が地表面に達し、表面流も生じるという形態がより一般的であると考えられる。

このような中間流と表面流を一体的に流量流積関係式として表した kinematic wave モデルは、次式で表される [23)]。

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial q}{\partial x}=r \qquad (4.3.1)\text{（再掲）}$$

$$q=\begin{cases} ah & (0<h<d) \\ \alpha(h-d)^m+ah & (h\geq d) \end{cases} \qquad (4.3.5)$$

ここに、d：表土層の空隙部分の深さ（m）、a：定数（m/sec）であり、d および水深 h はそれぞれ、次のように定義される。

$$d=\gamma D \qquad (4.3.6)$$

$$h=\gamma H_A+H_S \qquad (4.3.7)$$

ここに、D：表土層厚（m）、γ：表土層空隙率、H_A：中間流水深（m）、H_S：表面流水深（m）である（図-4.3.2 参照）。

また、式(4.3.5)の a は中間流の流速を表しており、ダルシー則に基づき、

$$a=k\sin\theta/\gamma \qquad (4.3.8)$$

で与えられる。ここに、k：透水係数（m/sec）である。

上記のような、雨水の流れを物理的に解く kinematic wave の計算を、流域の地形を忠実に表現した地形モデル上で詳細に行うことにより、実際の流域の流域特性に即した流出計算を行うことができる。

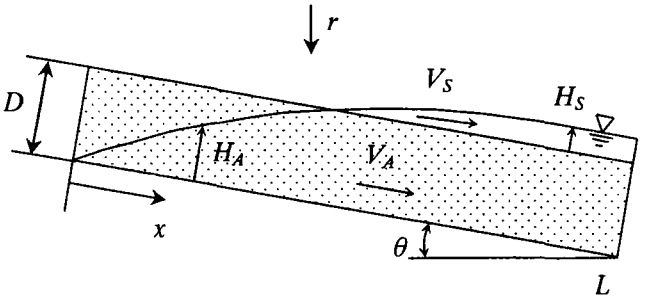


図-4.3.2　表面流・中間流統合型 kinematic wave モデル [23)]

本研究では、流域の地形モデルとして、図-4.3.3 に示すようなモデルを用いる。

この地形モデルは、国土地理院の数値地図（50m メッシュ標高）から生成した落水線網である。通常、落水線網はメッシュデータの各格子点から、隣接する周囲の８つの格子点のうち最急勾配で下る方向に落水線を設けることにより、作成する。

ただし、図-4.3.3 の地形モデルでは、こうした落水線に加え、最急勾配で上る方向にも落水線を設けている。このような線を追加することにより、斜面を下るに従い斜面幅が広がる発散型の地形において落水線の分流が生じ、発散型の地形が流出形態に与える影響を考慮できるようになる[25)]。

この図-4.3.3 に示した地形モデルのデータセットは、市川ら[26)]により開発、整備、公開されているプログラムにより作成した。

なお、図-4.3.3 において落水線が分流する格子点では、上流側から流れてきた流水を、分流する複数の落水線に配分する必要がある。この配分のしかたは、次に示す流量配分率αにより決定するものとしている。ある格子点からN本の落水線が分岐している場合、第i番目の落水線への流量配分率α_iは、次式で表すものとしている。

$$\alpha_i = \frac{\dfrac{\sqrt{I_i}}{n_i} B_i}{\displaystyle\sum_{j=1}^{N} \frac{\sqrt{I_j}}{n_j} B_j} \tag{4.3.9}$$

ここに、n：Manning の粗度係数、I：落水線の斜面勾配、B：落水線の斜面幅である。

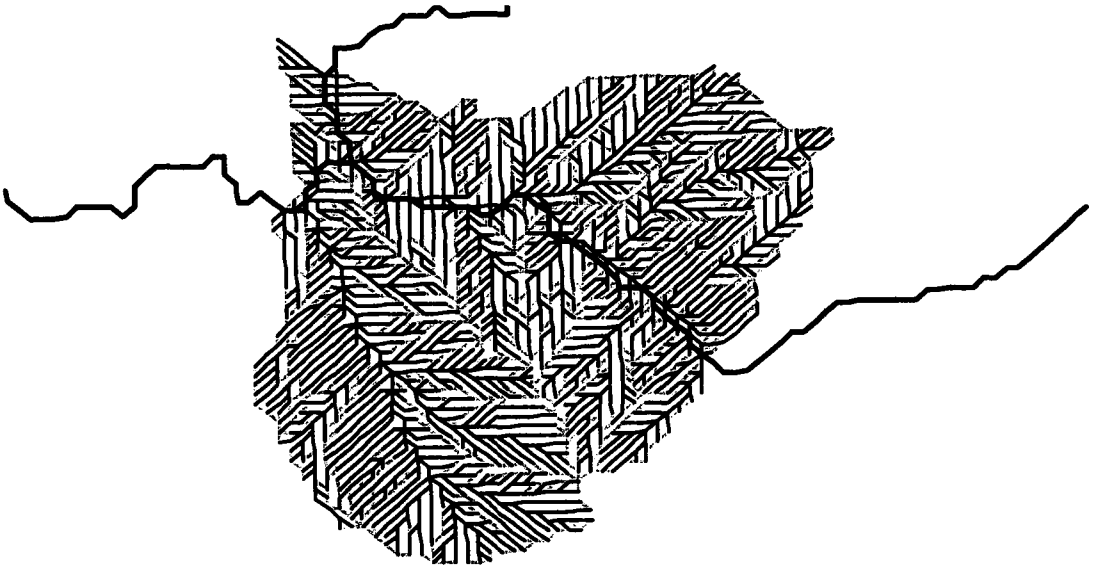


図-4.3.3　流域地形モデル（部分）

（３）表面流・中間流統合型 kinematic wave モデルの集中化

（２）に示した流出計算モデルは、計算に多大な時間を要し、実用に当たっては計算時間を実用的なレベルまで軽減する必要がある。こうした問題に対し、市川ら [19]は、山腹斜面における雨水の流れを逐一追跡計算するのでなく、雨水の空間的分布を定常状態のそれで近似することによって、kinematic wave モデルを集中化する手法を提案している。

この集中化は、具体的には、（２）に示したモデルに基づいて流域の貯留量と流出高の関係を表すテーブルを作成しておき、そのテーブルによる貯留関数法の計算を元の詳細なモデルの代用とするものである。

テーブルの作成では、定常でかつ空間的に一定な降雨を元の詳細なモデルに対して与え、計算される流出現象が定常になったときに流域の落水線上に存在する総水量を求め、それを流域の貯留量とする。与える降雨強度を、0 mm/hour，1 mm/hour，2 mm/hour，…というように変化させ、それぞれの降雨強度に対する貯留量を求めることにより、テーブルを作成する。流域からの流出高（mm/hour）は、定常な状態を考えるので、降水の強度に等しくなる。

このテーブルを、本研究では、数 km^2 程度に分割した各部分流域ごとに作成した。分割の詳細については第４節に後述するが、上記のようにして作成した各部分流域のテーブルの一つを、例として表-4.3.1 に示す。

表-4.3.1　貯留量と流出高の関係を表すテーブルの作成例

部分流域番号 23（流域面積 4.737120 km^2）

流出高 q（mm/hour）	貯留量 S（m^3）
0	0.0
1	42,652.0
2	69,207.4
3	92,386.1
4	113,169.2
5	132,080.0
6	149,590.6
7	165,872.4
8	181,159.6
9	195,551.0
10	209,151.4
⋮	⋮
100	642,858.0

集中化された kinematic wave モデルでは、以下の式により、対象とする流域からの流出高を計算することとなる。

$$\frac{dS}{dt} = r(t)\cdot\frac{A}{3.6} - q(t)\cdot\frac{A}{3.6} \tag{4.3.10}$$

$$S(t) = f\left(q(t)\right) \tag{4.3.11}$$

ここに、t：時間（sec）、S：流域の貯留量（m^3）、r：降雨強度（mm/hour）、q：流出高（mm/hour）、A：流域面積（km^2）、f：貯留量と流出高の関係を表す関数（表-4.3.1 のようなテーブルで定義される。）である。

すなわち、通常の貯留関数法の計算では、貯留量 S と流出高 q の関係を表す関数は $q = KS^P$ という形の式で表現されるが、本モデルでは、表-4.3.1 に示した形式のテーブルが、貯留量 S と流出高 q の関係を定義することとなる。

なお、テーブルでは、貯留量と流出高の関係が離散的に表されているが、離散値の間は、線形的に補間する。

図-4.3.4 に、集中化された表面流・中間流統合型 kinematic wave モデルと、集中化を行わないモデルによる計算結果の比較を、2004 年 7 月 18 日の出し平ダムの出水を例として示す。

ここに、表面流・中間流統合型 kinematic wave モデルのパラメータは、Manning の粗度係数 n：0.3（m-sec）、表面流の定数 m：1.667、表土層の透水係数 k：0.015（m/sec）、表土層空隙率 γ：0.25、表土層厚 D：0.05（m）を用い、流出率を 0.6（一定）とした。

なお、対象流域下流端に位置する出し平ダムへの流入量を算出するに際しては、斜面の流出計算（集中化を行ったモデル・行わないモデルによる）だけでなく、その計算結果を受けて河道の流れも計算する必要があるが、ここでは、後述する河道網集中型 kinematic wave モデルにより、河道の計算を行った。ただし、後述するカルマンフィルタの導入、有効降雨の算出、および、融雪成分の考慮については、ここでは行っていない。

図-4.3.4 を見ると、集中化した表面流・中間流統合型 kinematic wave モデルでは、集中化を行わないモデルに比べ、立ち上がりがやや早く、また、ピーク流量も若干小さい計算結果となっている。これらは、市川ら [19]の計算結果においても同様の傾向が見られる点であり、集中化したモデルの実用にあたっては、この特性を踏まえたうえでモデルパラメータの調整を行う必要があるといえる。

しかし上記の細かい点を除き、全体的に、集中化したモデルによって、集中化を行わないモデルとほぼ同様の計算結果が得られており、十分に利用できるモデルであることがわかる。

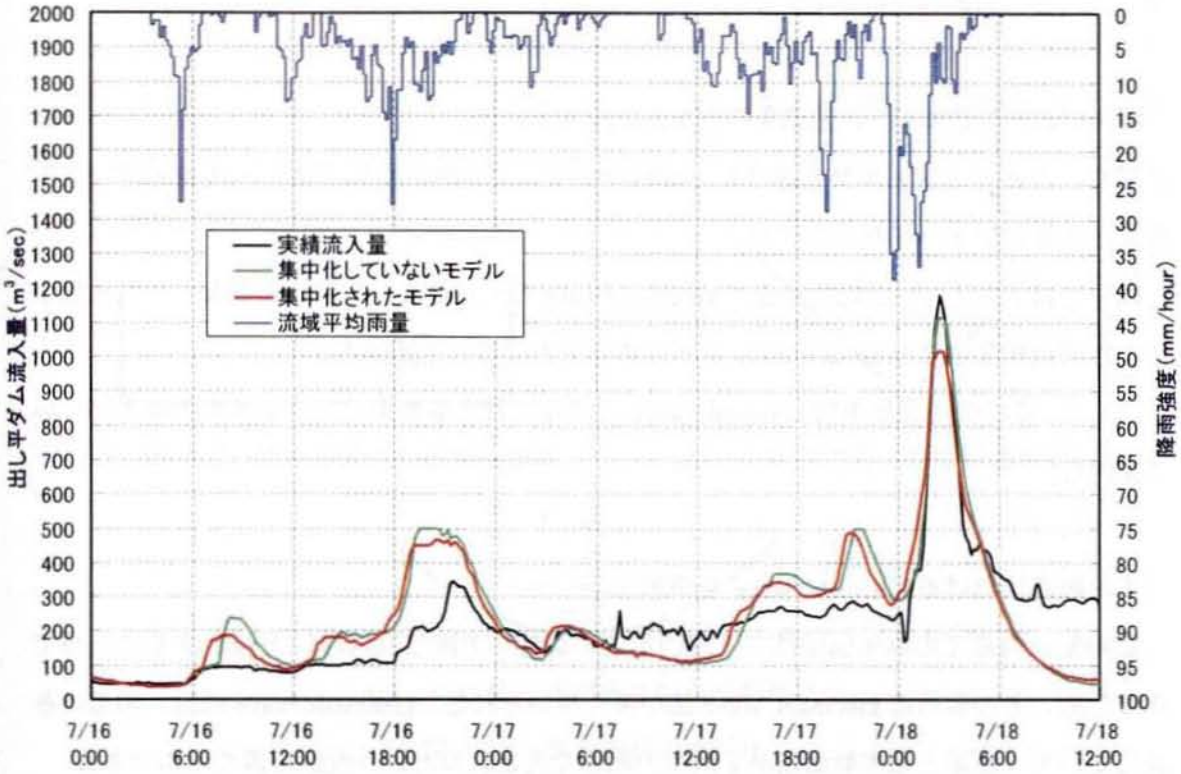


図-4.3.4　集中化された表面流・中間流統合型 kinematic wave モデルと集中化をしないモデルによる計算結果の比較（2004 年 7 月 18 日出水）

一方、計算時間については、6 時間分の流出計算を行うのに要する時間を比較したところ、集中化を行わない詳細なモデルで 4～20 分を要したのに対し、集中化したモデルは 9～10 秒であった。ここに、計算を行った計算機の環境は、CPU：Pentium4 3.4GHz, メモリ：2.00GB、OS：Windows XP, コンパイラ：Microsoft Visual C++ 6.0 である。なお、集中化を行わないモデルにおいて計算時間の値に幅があるのは、雨量・流量がほぼゼロの時と、洪水ピーク時とで、計算量が異なるためである。

以上より、10 分ごとに 6 時間先までの実時間流入量予測の計算を行いたいと考える場合、上記の計算機環境では、集中化を行わないモデルでの計算が不可能であるのに対し、集中化したモデルは、リアルタイム予測に用いるに際して十分実用的な計算速度を実現できていることがわかる。

４．３．２　河道の流れのモデル

河道の流れの計算は、河道網集中型 kinematic wave モデル [17]により行う。また、その計算に対し、カルマンフィルタを適用し、流域内のダムで計測される実際の流入量のデータを逐次、計算にフィードバックする。

以下では、まず、一般的な河道の kinematic wave モデルについて概説した後、それを集中化した河道網集中型 kinematic wave モデルの考え方について述べる。

さらに、その河道網集中型 kinematic wave モデルに対するカルマンフィルタの導入について述べる。

（１）河道における kinematic wave モデル

急勾配の河道での洪水伝播は、下流の水位の影響が上流に及ばないと仮定することができるため、その解析に kinematic wave 法が多く用いられる。kinematic wave 法は、河道の各点において、流量と通水断面積が１対１の関係で表されるという仮定を置くものである。

kinematic wave モデルの基礎式は、以下のとおりである。

<u>連続式</u>

$$\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}=Q_L(t) \tag{4.3.12}$$

<u>運動方程式</u>

$$Q=f(A) \tag{4.3.13}$$

ここに、

$Q(t,x)$：断面平均流量（m^3/sec）

$A(t,x)$：通水断面積（m^2）

$Q_L(t)$：単位距離当りの側方流入量（m^2/sec）

t：時刻（sec）

x：計算区間上端からの距離（m）

である。

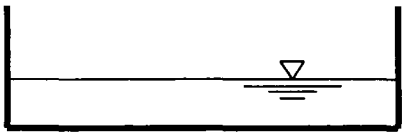
式(4.3.13)は河道の流量 Q と通水断面積 A の関係を表す式であり、以下のようにモデル化することが多い。

まず、河道の断面において、径深 R および通水断面積 A は河川水位に応じて変化するが、R と A の関係は概ね次の形の式で近似することができる。

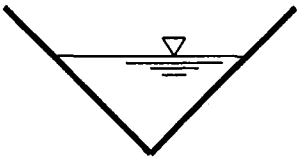
$$R = K_1 A^Z \tag{4.3.14}$$

ここに、K_1，Z：断面の形状により定まる係数である。

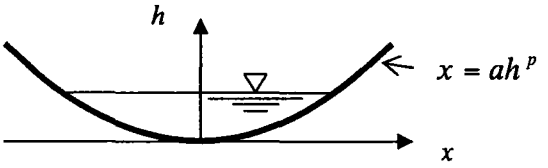
河道の断面形状が幅の広い矩形や三角形、あるいはべき乗の式で表される場合、K_1，Z の値は、断面形状から幾何学的に求めることができる。



(a)　幅の広い矩形で表される断面形状



(b)　三角形で表される断面形状



(c)　べき乗の式で表される断面形状

図-4.3.5　断面形状の単純化

式(4.3.14)に加え、断面平均流速 v（ $= Q / A$）と径深 R の間に、Manning 則が成り立つとする。

$$v = \frac{1}{n} I^{\frac{1}{2}} R^{\frac{2}{3}} \tag{4.3.15}$$

ここに、

I：河床勾配

n：Manning の粗度係数（m-sec 系）

である。

式(4.3.14)と式(4.3.15)より、流量 Q と通水断面積 A の関係（式(4.3.13)）は、次式のようなべき乗の関係になる。

$$A = KQ^P \tag{4.3.16}$$

ここに、

$$P = \frac{3}{3 + 2Z}$$

$$K = \left(n \cdot I^{-\frac{1}{2}} K_1^{-\frac{2}{3}} \right)^P$$

である。

式(4.3.12)と式(4.3.13)からなる偏微分方程式は、初期時刻（$t = 0$）における各地点の流量$Q(0,x)$（初期条件）と、上流端における時々刻々の流量$Q(t,0)$（境界条件）、および時々刻々の側方流入量$Q_L(t)$を与えることにより、各点における時々刻々の$Q(x,t)$を計算することができる。

（２）河道網集中型 kinematic wave モデル [17)]

前述の kinematic wave モデルは通常、特性曲線法や、差分法を用いて解かれる。

計算対象の河川が複数の河道区分から成っていて、それらの河道区分が樹枝状の河道網を形成しているような場合は、上流側に位置する河道区分から順に、kinematic wave の計算を行うことにより、河道網全体の水の流れを解析することができる。

しかし、その計算は、対象流域が大きくなり、また、河道網を構成する河道の個数が多くなると、多大な時間を要するようになる。

高棹ら [17)]は、この問題に対し、河道網における kinematic wave モデルを集中化する方法を考案している。これは、対象とする河道網をいくつかの部分的な河道網に分割し、その分割した各部分河道網の内部では河川の流量が河道に沿う距離とともに直線的に変化していると仮定することで、流れのモデルを集中化するものである。以下に、その考え方の概要を示す。

高棹らが提案する河道網集中型 kinematic wave モデルでは、まず、対象流域の河道網を部分流域ごとに区切り、各部分流域内の河道の流れをモデル化するにあたり、以下の二つの仮定を置く。

<u>仮定１</u>

河道では、流量と通水断面積の関係が、べき乗の関数で表されるものとする。すなわち、部分流域Jの河道区分iの上流からx (m)の距離の地点における時刻t (sec)の通水断面積$A_i^J(x,t)$と流量$Q_i^J(x,t)$の間には、

$$A_i^J(x,t) = K_i^J \, Q_i^J(x,t)^{P_i^J} \tag{4.3.17}$$

なる関係があるとする。ただし、ここで河道区分とは部分流域内の河道網を合流点等において区分したものであり、K_i^J、P_i^Jは、部分流域Jの河道区分iに固有の定数とする。なお、この式(4.3.17)の仮定は、前述の一般的な kinematic wave モデルにおける式(4.3.16)に対応するものである。

仮定２

河川の流量の値は、河道に沿う距離とともに直線的に変化しながら分布しているものとする。この流量の空間的な変化率は、各瞬間について部分流域内で一律であるとし、これを$q_0^J(t)$（m³/sec/m）と書くことにする。$q_0^J(t)$を用いて、$Q_i^J(x,t)$は次のように書ける。

$$Q_i^J(x,t) = Q_i^J(0,t) + q_0^J(t)\,x \tag{4.3.18}$$

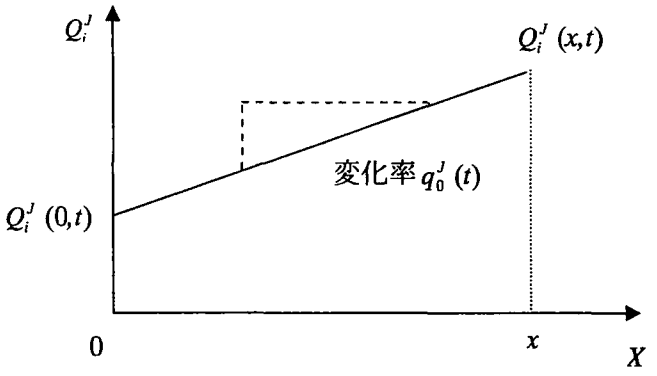


図-4.3.6　仮定２による流量と距離の関係

式(4.3.18)を式(4.3.17)に代入すると、

$$A_i^J(x,t) = K_i^J\left(Q_i^J(0,t) + q_0^J(t)\,x\right)^{P_i^J} \tag{4.3.19}$$

となる。この式(4.3.19)で与えられる$A_i^J(x,t)$をxについて積分することにより、河道区分iにおける河道内貯留量$S_i^J(t)$ (m³)が求められる。

$$\begin{aligned} S_i^J(t) &= \int_0^{L_i^J} A_i^J(x,t)\,dx \\ &= \begin{cases} \dfrac{K_i^J}{q_0^J(t)\left(P_i^J+1\right)}\left\{Q_i^J(L_i^J,t)^{P_i^J+1} - Q_i^J(0,t)^{P_i^J+1}\right\} & \left(q_0^J(t) \neq 0\right) \\ K_i^J L_i^J Q_i^J(0,t)^{P_i^J} & \left(q_0^J(t) = 0\right) \end{cases} \end{aligned} \tag{4.3.20}$$

ここに、

L_i^J　：河道区分iの区分長

$Q_i^J(0,t)$　：河道区分iの上流端の流量

$Q_i^J(L_i^J,t)$　：河道区分iの下流端の流量

である。

河道区分上流端の流量$Q_i^J(0,t)$は、その河道区分に流れ込んでくる上流側の河道区分の流

量の合計で表される。ただし、河道区分 i の上流端が部分流域 J の外部からの流入口となっている場合は、その外部からの流入流量が河道区分 i の上流端流量を与える。

$$Q_i^J(0,t) = \begin{cases} \sum_{l=1}^{n} Q_{i_l}^J(L_{i_l}^J,t) & \text{（河道区分 } i \text{ の上流端に河道区分 } i_1,\cdots,i_n \text{ の下流端が接続している場合）} \\ I_m^J(t) & \text{（河道区分 } i \text{ の上流端が部分流域 } J \text{ への流入口 } m \text{ である場合）} \end{cases} \tag{4.3.21}$$

ここに、$I_m^J(t)$ は、部分流域 J における第 m 番目流入口への流入量（m^3/sec）である。

また、河道区分下流端の流量 $Q_i^J(L_i^J,t)$ は、式(4.3.18)より、次式で表される。

$$Q_i^J(L_i^J,t) = Q_i^J(0,t) + q_0^J(t)\,L_i^J \tag{4.3.22}$$

式(4.3.20)の $S_i^J(t)$ をすべての河道区分について足し合わせると、部分流域 J 全体の河道網内貯留量 $S^J(t)$ (m^3)となる。

$$S^J(t) = \sum_{i=1}^{N^J} S_i^J(t) \tag{4.3.23}$$

ここに、N^J は、部分流域 J の河道区分の個数である。

以上の式(4.3.20)～式(4.3.23)より、部分流域 J への流入量 $I_i^J(t)$, $i = 1,\cdots,M_{in}^J$ が既知であれば、$S^J(t)$は $q_0^J(t)$ の関数として表せることがわかる。

一方、河道網内貯留量 $S^J(t)$の連続式について考えると、式(4.3.24)で表すことができる。

$$\frac{dS^J(t)}{dt} = \sum_{i=1}^{M^J} I_i^J(t) + Q_L^J(t) - O^J(t) \tag{4.3.24}$$

ここに、

$I_i^J(t)$　：部分流域 J への流入量（m^3/sec）

M^J　：部分流域 J への流入口の個数

$O^J(t)$　：部分流域 J からの流出量（m^3/sec）

$Q_L^J(t)$　：部分流域 J における側方流入量（m^3/sec）

である。

また、仮定２より、$q_0^J(t)$ と部分流域 J への流入、流出の関係は次のように表せる。

$$q_0^J(t) = \frac{O^J(t) - \sum_{i=1}^{M^J} I_i^J(t)}{\sum_{i=1}^{N^J} L_i^J} \tag{4.3.25}$$

式(4.3.25)を式(4.3.24)に代入すると次式となり、すなわち、$dS^J(t)/dt$ は、$q_0^J(t)$ の関数として表すことができる。

$$\frac{dS^J(t)}{dt} = Q_L^J(t) - q_0^J(t)\sum_{i=1}^{N^J} L_i^J \tag{4.3.26}$$

部分流域の外部から部分流域 J へ流入する流入量 $I_i^J(t)$, $i = 1,\cdots,M_{in}^J$、および部分流域 J における側方流入量 $Q_L^J(t)$ が既知であれば、式(4.3.23)と式(4.3.26)とからなる微分方程式を解くことにより、河道網内貯留量 $S^J(t)$ と流量変化率 $q_0^J(t)$ の時間変化を求めることができる。

また、それに基づき、流出量 $O^J(t)$ の時間変化も求められる。

以上が河道網集中型 kinematic wave モデルの考え方であり、この計算を最上流の部分流域から下流の部分流域に向かって順に行うことにより、流域全体の河道の流れを解析することができる。

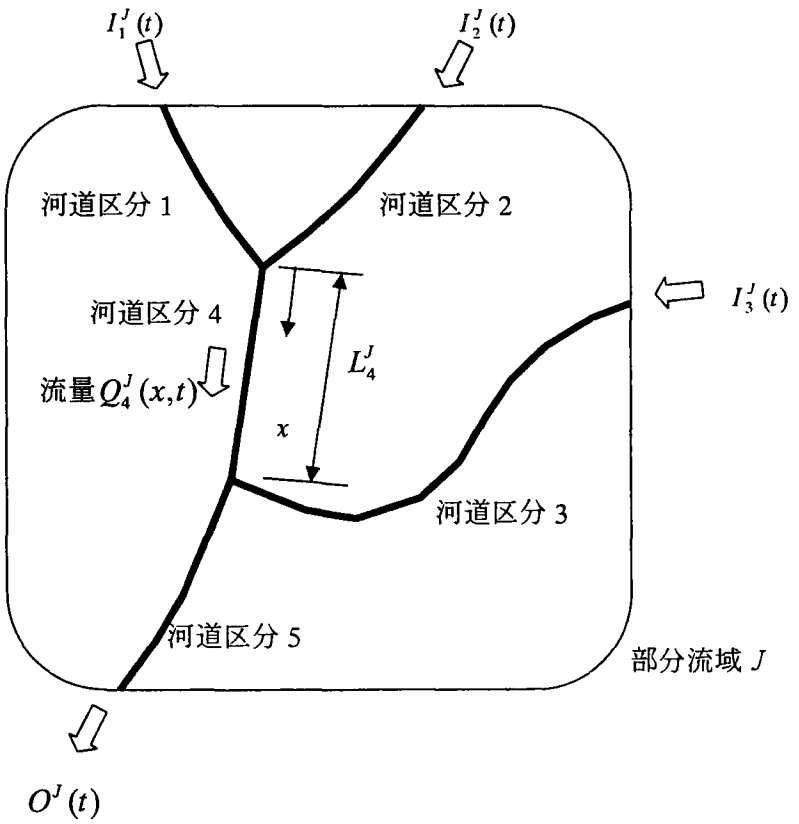


図-4.3.7　河道網集中型 kinematic wave モデルの模式図

（３）河道網集中型 kinematic wave モデルへのカルマンフィルタの導入

藤田ら[16]は、前述の河道網集中型 kinematic wave モデルに対し、カルマンフィルタを導入し、実測の流量データを流出計算にフィードバックさせる手法を提案している。以下では、その考え方の概要を示す。

はじめに、カルマンフィルタ[27]が適用される状態空間型システムは、以下の２式（状態方程式と観測方程式）で表される。

$$x_{k+1} = Fx_k + \xi_k + v_k \quad \text{（状態方程式）} \tag{4.3.27}$$

$$y_k = Hx_k + \eta_k + w_k \quad \text{（観測方程式）} \tag{4.3.28}$$

ここに、

x ：n次元状態ベクトル

y ：m次元観測ベクトル

v ：システムノイズ（n次元ベクトル）

w ：観測ノイズ（m次元ベクトル）

$F,\ H,\ \xi,\ \eta$ ：係数行列

$k,\ k+1$ ：時刻のステップを表す添字

である。

状態ベクトルxは、値を直接観測することができない。ただし、xの時間変化は式(4.3.27)で表されることが判っており、また、xとyの関係は式(4.3.28)で表されることがわかっている。また、観測ベクトルyは、時間ステップごとにその値を観測することができる。このような状態空間型システムにおいて、カルマンフィルタの理論を用いることにより、yの観測値を利用し、時々刻々のxの最も確からしい値を確率論的に推定することができる。

流出システムを上述の状態空間型システムとしてとらえる場合、一般に、河川の流量を観測ベクトルyとして位置づける。また、状態ベクトルxには、流出モデル内部で用いられている変数のうち、時々刻々の流域の状態を説明するのに十分な変数を採用する。すなわち、例えば貯留関数法モデルの場合、流域の貯留高を状態ベクトルxとして位置づけることができる。また、分布型の流出モデルの場合は一般に、流域の状態を説明するのに必要な変数は膨大な個数となるため、カルマンフィルタを適用することが非常に難しくなる。

実時間流出予測では、時々刻々の実測雨量を用いて状態方程式(4.3.27)と観測方程式(4.3.28)によりx, yの時間変化を計算しながら（時間更新）、また、yの観測値が得られた時にはその情報に基づき、状態量xをより確からしい値に推定しなおす（観測更新）。

そして、そのようにして推定された確からしいxを起点にして、予測雨量を用い、その後

の予測流量を計算することとなる。

（２）に示した河道網集中型 kinematic wave モデルにカルマンフィルタを適用するに当たっては、まず、どの変数を状態ベクトル x として位置づけるかを考える必要がある。

以下に、各部分流域の流量変化率 $q_0(t)$（m^3/sec/m）という変数を、カルマンフィルタにおける状態ベクトル x として位置づけられることについて、確認する。

河道網集中型 kinematic wave モデルでは、式(4.3.20)～式(4.3.23)より、部分流域 J の河道内貯留量 $S^J(t)$（m^3）は、部分流域 J の流量変化率 $q_0^J(t)$、および部分流域 J への流入量 $I_i^J(t)$, $i=1,\cdots,M_{in}^J$ の関数として表せる。

$$S^J(t) = F_S{}^J\left(q_0^J(t),\ I_1^J(t),\ \cdots,\ I_{M_{in}^J}^J(t)\right) \tag{4.3.29}$$

ここに、$F_S{}^J$ は、式(4.3.20)～式(4.3.23)より求められる関数である。

また、部分流域 J からの流出量 $O^J(t)$も、同じく、部分流域 J の流量変化率 $q_0^J(t)$、および部分流域 J への流入量 $I_i^J(t), i=1,\cdots,M_{in}^J$ の関数として表せる。

$$O^J(t) \quad = \quad q_0^J(t)\sum_{i=1}^{N^J} L_i^J \quad + \quad \sum_{i=1}^{M^J} I_i^J(t) \tag{4.3.30}$$

なお、部分流域 J への流入量は、その上流側に隣接している部分流域においては、流出量 $O(t)$である。すなわち、上流側に隣接する部分流域における流量変化率 $q_0(t)$および流入量 $I(t)$を用いて表すことができるものである。このような関係を最上流の部分流域までたどることにより、ある部分流域 J への流入量 $I_i^J(t), i=1,\cdots,M_{in}^J$ は、J よりも上流に位置するすべての部分流域の流量変化率 $q_0(t)$を用いて表すことができることがわかる。

$$I_i^J(t) = F_I{}^{J,i}\left(q_0^1(t),\cdots,q_0^{J-1}(t)\right) \tag{4.3.31}$$

ここに、$F_I{}^{J,i}$は上述の関係から求められる関数である。部分流域の番号 J は上流ほど若い番号となるようにつけるものとし、$q_0^1(t),\cdots,\ q_0^{J-1}(t)$ は、J よりも上流に位置する部分流域の流量変化率である。

式(4.3.29)に式(4.3.31)を代入することにより、部分流域 J の河道内貯留量 $S^J(t)$は、$q_0^1(t)$, $\cdots,\ q_0^{J-1}(t)$、および $q_0^J(t)$ の関数として表せることとなる。

$$S^J(t) = F_S'^J\left(q_0^1(t),\cdots,q_0^J(t)\right) \tag{4.3.32}$$

ここに、$F_S'^J$ は、$q_0^1(t),\cdots,q_0^J(t)$ の関数である。

一方、式(4.3.26)は、$0 \le \theta \le 1$ を用いて下記のように差分展開できる。

$$\frac{S^J(t+\Delta t) - S^J(t)}{\Delta t} = \theta Q_L^J(t+\Delta t) + (1-\theta) Q_L^J(t) - \left\{ \theta q_0^J(t+\Delta t) + (1-\theta) q_0^J(t) \right\} \sum_{i=1}^{N^J} L_i^J \tag{4.3.33}$$

$S^J(t)$は、式(4.3.32)より$q_0^1(t), \cdots, q_0^{J-1}(t)$，$q_0^J(t)$の関数として表せるため、これを代入すると式(4.3.33)は次のように表すことができる。

$$F^J\left(q_0^1(t+\Delta t), \cdots, q_0^J(t+\Delta t),\ \ q_0^1(t), \cdots, q_0^J(t) \right) = \theta Q_L^J(t+\Delta t) + (1-\theta) Q_L^J(t) \tag{4.3.34}$$

ここに、F^Jは$q_0^1(t+\Delta t), \cdots, q_0^J(t+\Delta t),\ \ q_0^1(t), \cdots, q_0^J(t)$の関数である。

式(4.3.34)と同様の式は、対象流域全体についてみると、部分流域の個数（N 個とする）分だけ立てることができる。

よって、時刻 t における各部分流域の流量変化率$q_0^1(t), \cdots, q_0^N(t)$が既知であれば、各部分流域における式(4.3.34)で構成される連立方程式を解くことにより、時刻 $t+\Delta t$ における流量変化率$q_0^1(t+\Delta t), \cdots, q_0^N(t+\Delta t)$を求めることができる。

このことは、各部分流域の流量変化率$q_0^1(t), \cdots, q_0^N(t)$を状態ベクトル x として考えた場合、x の時間変化を表す状態方程式（式(4.3.27)）が構築できることを表している。

さらに、式(4.3.30)、式(4.3.31)から示されるように、各部分流域からの流出量 $O^J(t)$は、$q_0^1(t)$，$\cdots$，$q_0^N(t)$を用いて表すことができる。これは、状態ベクトル x と観測ベクトル y の関係を表す観測方程式（式(4.3.28)）を構築できることを表している。

以上を利用し、各部分流域の流量変化率 $q_0(t)$からなるベクトル$\mathbf{q_0} = [q_0^1(t), \cdots, q_0^N(t)]^T$を状態ベクトルとするカルマンフィルタを構成することができる。

なお、本研究ではさらに、藤田ら[16]と同じく、システムノイズとして、時間的に指数関数的な相関を持つ有色ノイズを用いる。この有色ノイズ $p^J(t)$は、式(4.3.35)で表される。

$$\frac{dp^J(t)}{dt} = -\frac{1}{\tau} p^J(t) + \sqrt{\frac{2}{\tau}} w^J(t) \tag{4.3.35}$$

ここに、τ（>0）は時定数、$w^J(t)$は分散が１の白色ノイズである。

この有色ノイズを、各部分流域ごとに立てられる式(4.3.34)において、側方流入量$Q_L^J(t)$に付随させる形で付加する。

$$F^J\left(\mathbf{q_0}(t+\Delta t), \mathbf{q_0}(t)\right) = \theta \left\{ Q_L^J(t+\Delta t) + a A^J p^J(t+\Delta t)/3.6 \right\} + (1-\theta) \left\{ Q_L^J(t) + a A^J p^J(t)/3.6 \right\} \tag{4.3.36}$$

ここに、a（mm/hour）は誤差の大きさを表す係数、A^J（km^2）は部分流域Jの流域面積である。

すなわち、各部分流域における側方流入量$Q_L^J(t)$が、つねにその流域面積に応じた大きさの誤差を持っており、また、その誤差は持続性を有している（有色である）ということを仮定する形となる。

本研究では、ここまで述べたように、河道モデルについてはカルマンフィルタを導入し、ダム流入量の観測値を利用して随時モデルの状態量を修正するのに対し、斜面モデルについては降水から流出を一方向的に計算し、その状態量の補正を行わない決定論的なモデルとしている。

カルマンフィルタによる観測更新の対象を、現状の河道の流れの計算だけでなく斜面の流出計算まで広げるという考え方もあるが、本研究においては上記のように有色ノイズを導入することによって、河道への側方流入量、すなわち斜面モデルからの流出量にモデル誤差があることを考慮しており、そのモデル誤差の程度を、随時、ダム流入量の実測データに基づいて推定するモデルとしている。

４．３．３　有効降雨モデル

（１）有効降雨モデルの導入

４．３．１に示した斜面の流出モデルは表面流と中間流の計算を行うモデルであり、すなわち、洪水時の直接流出を扱うモデルである。この斜面の流出モデルにおいて、樹冠遮断や地中への浸透といった機構は考慮していないため、本システムでは、まず、降雨を損失降雨と有効降雨の成分に分け、有効降雨を斜面の流出モデルに与える必要がある。特に、洪水の立ち上がりの予測においては、こうした降雨損失の見積もり方の優劣が、計算結果に大きく影響する[1), 2)]。

実際の降雨のうち有効降雨の割合を示す流出率は、大まかに考えると、その時々の流域の湿潤の度合いと関連性を持つと言える。すなわち、降雨が続いて流域の湿潤の度合いが高いときは流出率が高く、反対に、晴天が続いて流域の湿潤の度合いが低いときは流出率も低くなる。

よって、流域の湿潤の度合いに応じて流出率を変動させることにより、実際の流出現象を精度良く再現できるような有効降雨を算定することができると考えられる。

本システムでは、各部分流域毎に、図-4.3.8 に示す比較的簡単なモデルを用い、有効降雨を算定することとした。同図に示すように、各部分流域毎に、時々刻々の雨量に流出率 f を乗じて有効降雨とする。直接流出に寄与しなかった損失降雨分についてはその累積をカウントしておき、その累積の大きさに応じて流出率を変動させる。これにより、洪水に先立つ前期降雨が大きいほど、流出率が大きくなる。

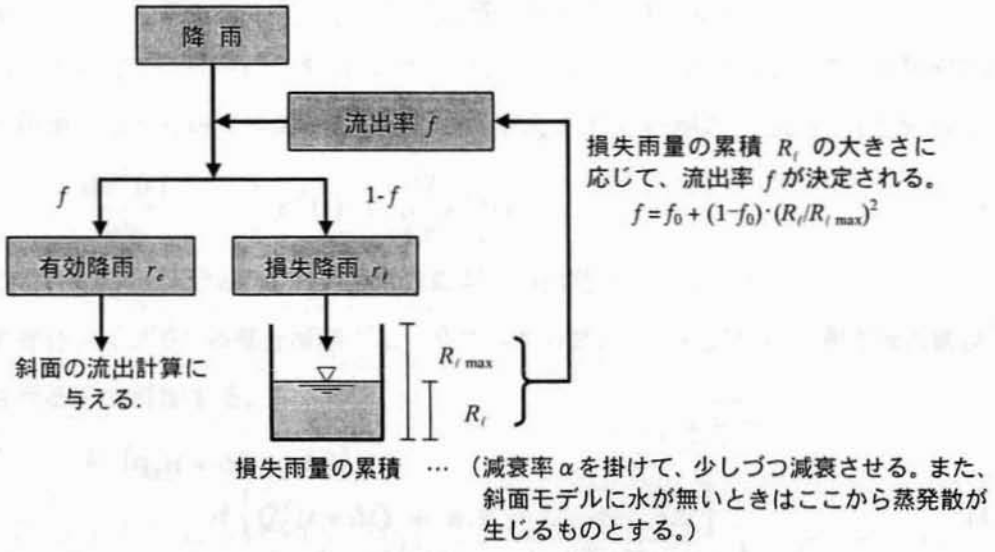


図-4.3.8　有効降雨モデルの概念図

流出率 f を算定する式は、具体的には以下に示す形とした。

$$f = f_0 + (1 - f_0)\left(\frac{R_\ell}{R_{\ell\,\max}}\right)^2 \tag{4.3.37}$$

ここに、R_ℓ：損失雨量の累積（mm）、$R_{\ell\,\max}$：損失雨量の累積の最大（mm）（定数）、f_0：流出率の最低値（定数）である。

損失雨量の累積 R_ℓ がゼロの時、流出率 $f = f_0$ であるが、R_ℓ が大きくなると流出率も大きくなり、$f = 1$ に近づく。

損失雨量の累積 R_ℓ は、1 時間ごとに減衰率 α を掛けて少しずつ減衰させ、その減衰分は基底流量分として、河道モデルにおいて、河道への側方流入量に付加するものとする。

また、この減衰分の他に、損失雨量の累積からは別途計算する蒸発散分が失われるものとする。ただし、斜面の流出モデルにおける流域の貯留量 S がゼロでない場合、この有効降雨モデルの損失雨量の累積 R_ℓ からは蒸発散分は失われず、斜面の流出モデルにおける流域の貯留量 S から蒸発散分が失われるものとした。

以上に示した有効降雨モデルでは、流出率の最低値 f_0、損失雨量の累積の最大 $R_{\ell\,\max}$、および減衰率 α がパラメータとなる。これらのパラメータは、流出計算結果が実績流入量に合うように設定した。

（２）蒸発散の算定

気温等の観測データから蒸発散を推定する方法は、大きく２つの方法に分けられる[28]。

①気温の関係式を用いる経験的な方法（ソーンスウェイトの式、ハーモンの式）

用いるデータ：気温（月平均気温）

②熱収支に基づく方法（ペンマン－モンテースの式）

用いるデータ：気温、風速、日射量、湿度

本研究では、対象流域において、

①気温のデータの取得ができること

②日射量、湿度等のデータの取得が現状ではできないこと

③出水時の直接流出の算定を目的としており、詳しい算定を行うことより計算が簡便であることが求められること

などの理由により、ソーンスウェイトの式を用いるものとした。

ソーンスウェイトの式は、下記で表される。

$$E_p(i) = 0.533 D_0(i)(10t_i/J)^a \tag{4.3.38}$$

$$a = 6.75\times10^{-7}J^3 - 7.71\times10^{-5}J^2 + 1.79\times10^{-2}J + 0.492$$

$$J = \sum_{i=1}^{12}(t_i/5)^{1.514}$$

ここで、$E_p(i)$はi月の１日当たりの基準となる蒸発散量（mm/day）であり、ソーンスウェイトの可能蒸発散量とよばれる。t_iはi月の月平均気温であり、$D_0(i)$は12hour/dayを１単位とするi月の月平均可照時間を表す。

なお、ソーンスウェイトの式は上記の通り、月平均気温に基づき、月あたりの蒸発散の値を推定するものである。

しかし、本研究においては、リアルタイムで時々刻々の蒸発散量を推定する必要があるため、上記の式を拡張し、月平均気温の代わりに、リアルタイムの時々刻々の気温を与え、その時間間隔毎の蒸発散量を算出するものとする。

蒸発散量の算定は各部分流域毎に行うものとし、また、各部分流域をさらに100mずつの標高帯に分け、各標高帯毎に、下記のように蒸発散量を推定するものとした。

①まず、ダム地点の気温データをもとに、各部分流域の各標高帯ごとの気温を推定する。

②推定した気温に基づき、ソーンスウェイトの式に基づき、各部分流域・各標高帯ごとの蒸発散量を算出する。

③各標高帯の面積で重みづけした平均を取ることにより、各部分流域ごとの流域平均蒸発散量を求める。

④で求めた蒸発散量を「可能蒸発散量」とし、その時刻に降水が無ければ、可能蒸発散量がそのまま蒸発散量になるものとし、降水があれば、蒸発散量はゼロとする。

標高に応じた気温の補正について、標高に伴う気温の減率は一般に、100mあたり0.5～0.6℃とされている。対象流域において気温データを取得することのできる出し平ダムおよび仙人谷ダムの、1994年～2005年にかけての月平均気温では標高100mあたりの気温差はほぼ0.5℃になっており（付録５に詳細データを示す。）、本研究では、標高に伴う気温の減率を100mあたり0.50℃とした。

表-4.3.2は、ソーンスウェイトの式を用いて、出し平ダムおよび仙人谷ダムの実績の月平均気温データ（1994～2005年）に基づき、対象流域における月ごとの蒸発散量を求めたものである。この蒸発散量は、まず各部分流域ごとに月蒸発散量を求め、それを平均して流域全体の値を求めたものである。

表-4.3.2　月毎の可能蒸発散量（出し平ダム～黒部ダム流域平均、ソーンスウェイト法による）

（単位：mm）

	1994年～1995年	1995年～1996年	1996年～1997年	1997年～1998年	1998年～1999年	1999年～2000年	2000年～2001年	2001年～2002年	2002年～2003年	2003年～2004年	2004年～2005年
11月	11.0	2.0	7.0	9.8	7.4	9.3	11.3	6.6	0.9	20.0	18.3
12月	0.2	0.0	0.2	0.3	0.6	0.1	0.2	0.1	0.1	0.3	0.9
1月	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2月	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3月	0.3	0.1	0.8	1.0	0.8	0.1	0.1	1.5	0.1	0.5	0.1
4月	10.9	4.1	17.2	33.8	16.6	8.0	14.9	26.6	14.4	18.7	14.8
5月	50.1	45.1	55.2	68.8	59.3	52.9	62.5	55.2	58.7	55.2	48.8
6月	66.1	68.5	77.8	82.1	74.6	70.7	74.7	75.5	76.7	77.3	84.5
7月	89.1	92.2	98.1	104.3	96.6	100.1	108.6	106.1	86.0	105.0	95.8
8月	101.4	96.3	102.6	96.8	107.0	107.6	103.6	103.2	97.8	104.5	103.8
9月	63.3	63.9	70.9	79.0	81.9	76.3	71.5	73.6	75.2	80.8	83.1
10月	41.3	35.4	29.5	50.9	41.7	42.7	40.9	37.7	32.7	42.4	48.6
計	433.6	407.7	459.3	526.7	486.4	467.7	488.3	486.0	442.4	504.6	498.8

つぎに、ソーンスウェイトの式を月毎でなく、毎時の蒸発散量を求められるよう拡張して適用し、出し平ダムおよび仙人谷ダムの毎時の実績の気温を用いて、毎時の蒸発散量を算定したものを示す。表-4.3.3 は、このようにして算出した毎時の蒸発散量から、各月の総蒸発散量を求めたものである。

表-4.3.3 によると表-4.3.2 との差は小さく、このため、月ごとの総蒸発散量という観点で見れば、ソーンスウェイトの式を月毎でなく、毎時の蒸発散量の算出に用いることは、あまり大きな問題はないといえる。

図-4.3.9 は、出し平ダム、仙人谷ダムの毎時の実績の気温を用いて求めた可能蒸発散量（黒部ダム～出し平ダム間全域の流域平均値）の年間の推移図である。

表-4.3.4、図-4.3.10 は、表-4.3.3、図-4.3.9 で求めた可能蒸発散量に対し、降水時の蒸発散量をゼロとした、蒸発散量である。

年間の総蒸発散量について、わが国の森林蒸発散量はほぼ 400～1,100 mm/年 [28] とされているが、表-4.3.4 の年間総蒸発散量の値は 370～440 mm/年であり、対象流域の標高が高いため全国の平均的な値よりは若干小さくなるものと考えられ、ほぼ妥当と言って良い範囲にあると考えられる。

表-4.3.3　月毎の可能蒸発散量（出し平ダム～黒部ダム流域平均、ソーンスウェイト法を適用した毎時の計算による。括弧内の数値は、表-4.3.2 からの差を表す。）

（単位：mm）

	1994年～1995年	1995年～1996年	1996年～1997年	1997年～1998年	1998年～1999年	1999年～2000年	2000年～2001年	2001年～2002年	2002年～2003年	2003年～2004年	2004年～2005年
11月	15.0 (+3.9)	5.0 (+3.0)	11.9 (+4.9)	13.5 (+3.8)	13.1 (+5.8)	13.0 (+3.8)	14.8 (+3.6)	9.3 (+2.7)	2.0 (+1.1)	21.6 (+1.7)	19.7 (+1.4)
12月	1.6 (+1.5)	0.3 (+0.3)	1.2 (+1.0)	1.5 (+1.2)	2.1 (+1.5)	0.8 (+0.7)	1.4 (+1.2)	1.0 (+0.9)	0.7 (+0.6)	2.0 (+1.7)	3.8 (+2.9)
1月	0.2 (+0.2)	0.5 (+0.5)	0.3 (+0.3)	0.3 (+0.3)	0.2 (+0.2)	0.6 (+0.6)	0.1 (+0.1)	0.4 (+0.4)	0.1 (+0.1)	0.1 (+0.1)	0.2 (+0.2)
2月	0.1 (+0.1)	0.4 (+0.4)	0.4 (+0.4)	1.0 (+1.0)	0.3 (+0.3)	0.0 (+0.0)	0.3 (+0.3)	0.5 (+0.4)	0.2 (+0.2)	1.2 (+1.1)	0.1 (+0.1)
3月	2.0 (+1.8)	2.4 (+2.2)	3.4 (+2.6)	4.5 (+3.6)	3.7 (+2.9)	1.5 (+1.5)	2.2 (+2.0)	5.0 (+3.5)	1.6 (+1.5)	3.6 (+3.0)	1.3 (+1.3)
4月	16.4 (+5.5)	11.9 (+7.8)	20.2 (+3.0)	36.4 (+2.6)	21.7 (+5.2)	12.0 (+4.0)	20.1 (+5.1)	28.7 (+2.0)	18.8 (+4.4)	23.3 (+4.6)	19.3 (+4.5)
5月	49.1 (−1.0)	44.5 (−0.6)	54.2 (−1.0)	68.0 (−0.8)	54.2 (−5.0)	51.8 (−1.1)	59.1 (−3.4)	54.3 (−0.8)	57.7 (−1.0)	54.3 (−0.9)	47.8 (−1.0)
6月	65.5 (−0.6)	68.0 (−0.6)	77.2 (−0.5)	81.7 (−0.3)	74.1 (−0.5)	69.8 (−0.8)	74.1 (−0.5)	74.9 (−0.6)	76.2 (−0.5)	76.7 (−0.6)	83.9 (−0.6)
7月	88.7 (−0.4)	91.7 (−0.5)	97.8 (−0.3)	104.1 (−0.2)	96.3 (−0.3)	99.7 (−0.4)	108.3 (−0.3)	105.8 (−0.3)	85.8 (−0.2)	104.7 (−0.3)	95.5 (−0.3)
8月	101.2 (−0.2)	96.0 (−0.3)	102.4 (−0.2)	96.7 (−0.1)	106.7 (−0.3)	107.4 (−0.3)	103.4 (−0.2)	102.9 (−0.3)	97.6 (−0.2)	104.2 (−0.3)	103.7 (−0.2)
9月	62.8 (−0.4)	63.5 (−0.4)	70.3 (−0.6)	78.8 (−0.2)	81.7 (−0.2)	75.8 (−0.6)	70.9 (−0.6)	73.0 (−0.6)	74.7 (−0.5)	80.6 (−0.2)	82.8 (−0.3)
10月	40.7 (−0.6)	35.4 (+0.1)	30.5 (+1.0)	50.1 (−0.8)	40.9 (−0.8)	42.2 (−0.5)	40.4 (−0.5)	38.1 (+0.4)	32.6 (−0.1)	41.9 (−0.5)	47.8 (−0.8)
計	453.8	431.3	479.2	547.6	504.5	482.1	502.4	501.2	453.5	524.0	513.8

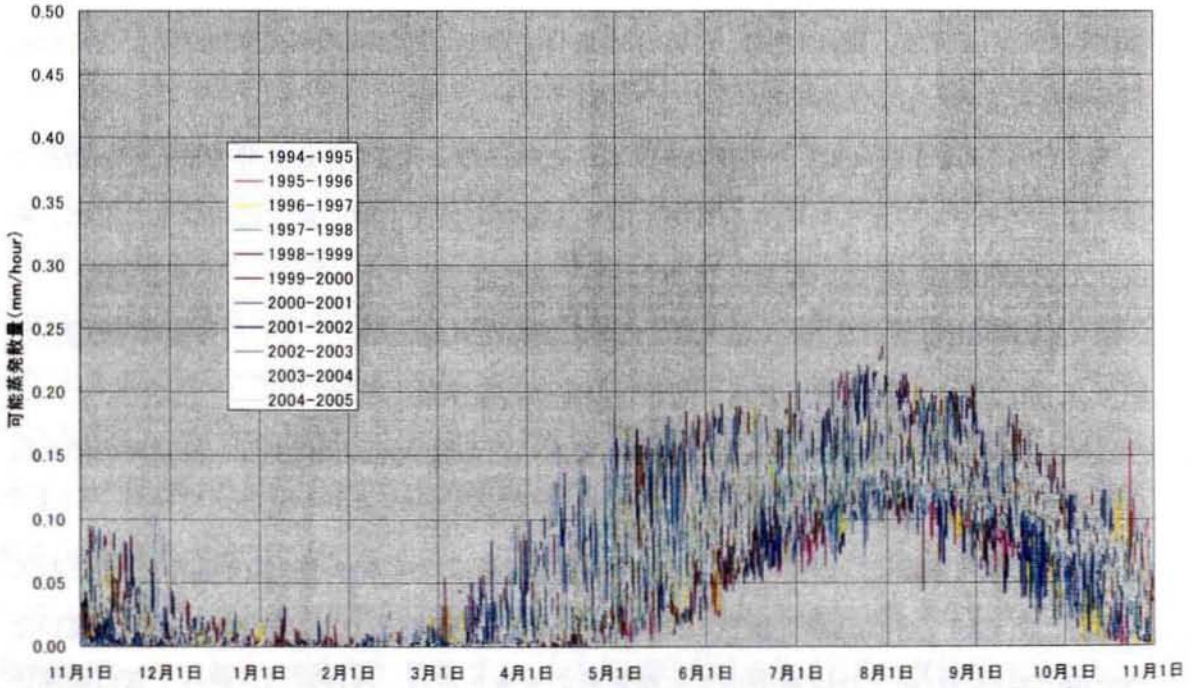


図-4.3.9　可能蒸発散量の年間推移（出し平ダム～黒部ダム流域平均、ソーンスウェイト法を適用した毎時の計算による）

表-4.3.4　月毎の蒸発散量（出し平ダム～黒部ダム流域平均、ソーンスウェイト法を適用した毎時の計算による）

（単位：mm）

	1994年～1995年	1995年～1996年	1996年～1997年	1997年～1998年	1998年～1999年	1999年～2000年	2000年～2001年	2001年～2002年	2002年～2003年	2003年～2004年	2004年～2005年
11月	12.3	4.2	7.0	9.3	11.6	9.6	11.1	7.4	1.4	15.7	16.5
12月	1.2	0.2	1.0	1.1	1.7	0.6	1.1	0.7	0.6	1.6	2.8
1月	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.5	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1
2月	0.1	0.4	0.4	0.9	0.2	0.0	0.3	0.4	0.2	1.1	0.1
3月	1.7	1.8	2.7	3.8	3.2	1.4	2.0	4.3	1.4	3.4	1.1
4月	13.7	11.5	17.2	31.8	20.4	10.9	19.5	25.4	14.1	20.6	17.5
5月	43.3	42.5	45.9	55.3	48.1	47.7	52.4	46.0	54.9	42.5	42.8
6月	57.5	55.8	68.5	65.0	58.3	59.7	57.6	68.3	66.3	65.3	74.8
7月	60.6	85.6	74.1	89.8	85.2	92.3	101.8	90.9	72.7	89.4	77.1
8月	91.0	86.1	95.4	71.3	97.7	103.5	94.5	94.6	77.2	93.5	88.1
9月	54.0	55.4	59.5	69.1	67.0	64.8	61.8	65.3	62.8	66.2	75.8
10月	35.2	30.2	27.8	40.4	34.8	34.7	32.6	32.7	28.5	34.1	40.4
計	370.8	374.0	399.8	438.2	428.6	425.7	434.8	436.2	380.1	433.5	437.0

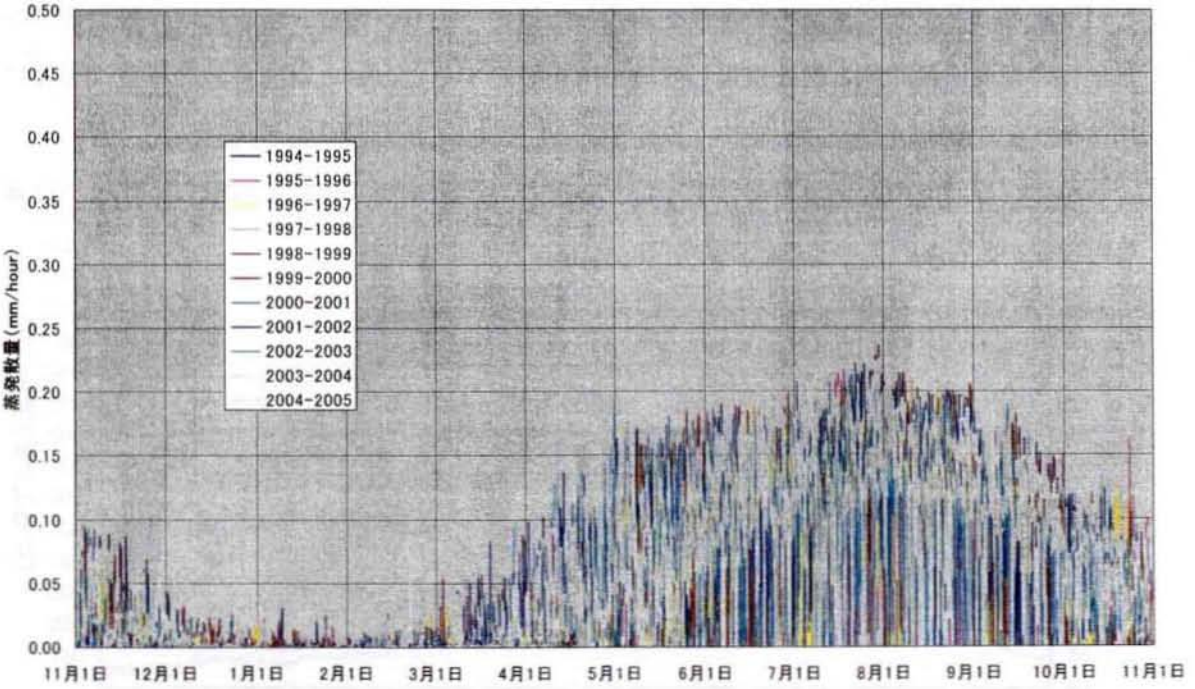


図-4.3.10　蒸発散量の年間推移（出し平ダム～黒部ダム流域平均。図-4.3.9 の可能蒸発散量に対して、降雨時の蒸発散量をゼロとした。）

（３）有効降雨モデルの効果

この有効降雨モデルを用いて流出計算を行った場合と、有効降雨モデルを用いず流出率一定として流出計算を行った場合の比較を図-4.3.11 に示す。なお結果は実測雨量を用いた上で、カルマンフィルタによる実測流量のフィードバックを行わずに流出計算を実施し、流量を計算したものである。

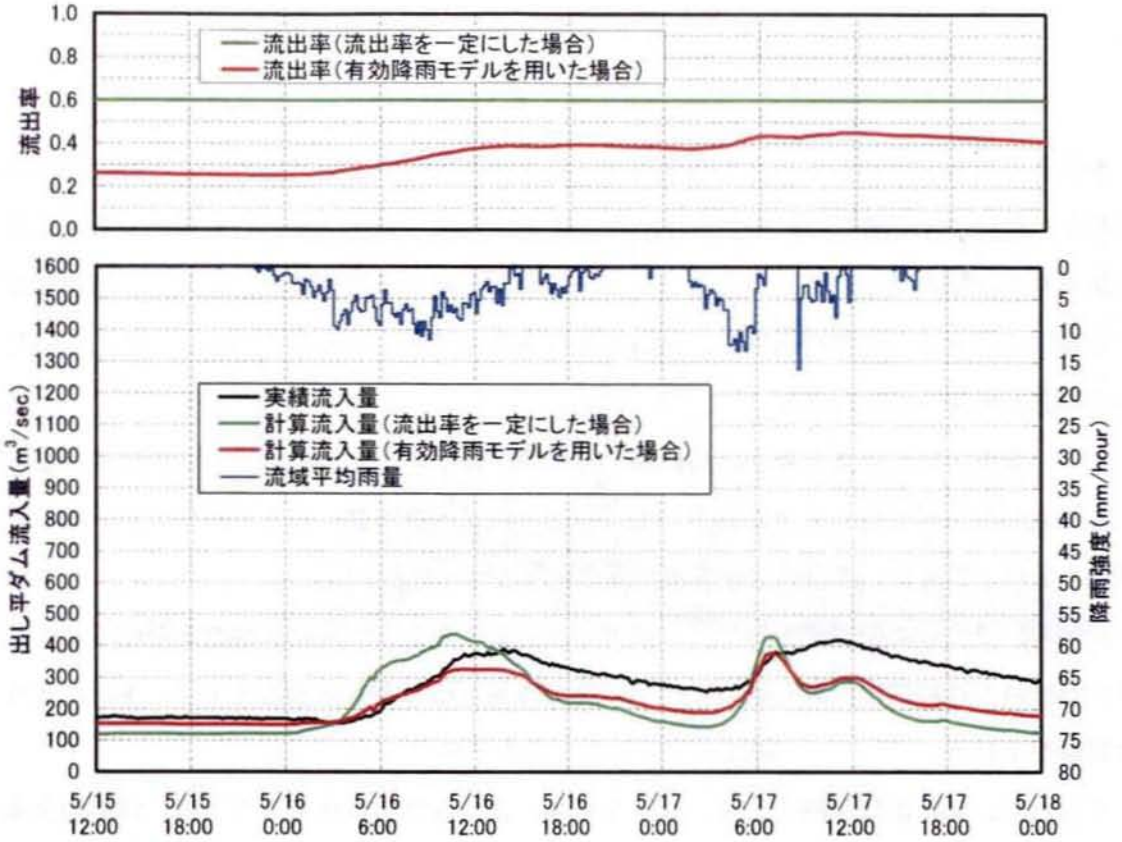
ここに、図-4.3.8 に示した有効降雨モデルの各係数は、流出率の最低値 f_0：0.20、損失雨量の累積の最大 $R_{l\,\max}$：200mm、減衰率α：1 時間当たり 0.992 とした。

これらのパラメータを設定するにあたっては、流出計算結果が実績流入量に合うように設定しており、特に、１出水における有効雨量の総量と実際の総流出量とがほぼ同程度になるように留意して設定した。また、計算では、出水の 50 日前から降雨データを用いて流出率の算定を開始し、出水に先立つ前期降雨の影響を反映させた。

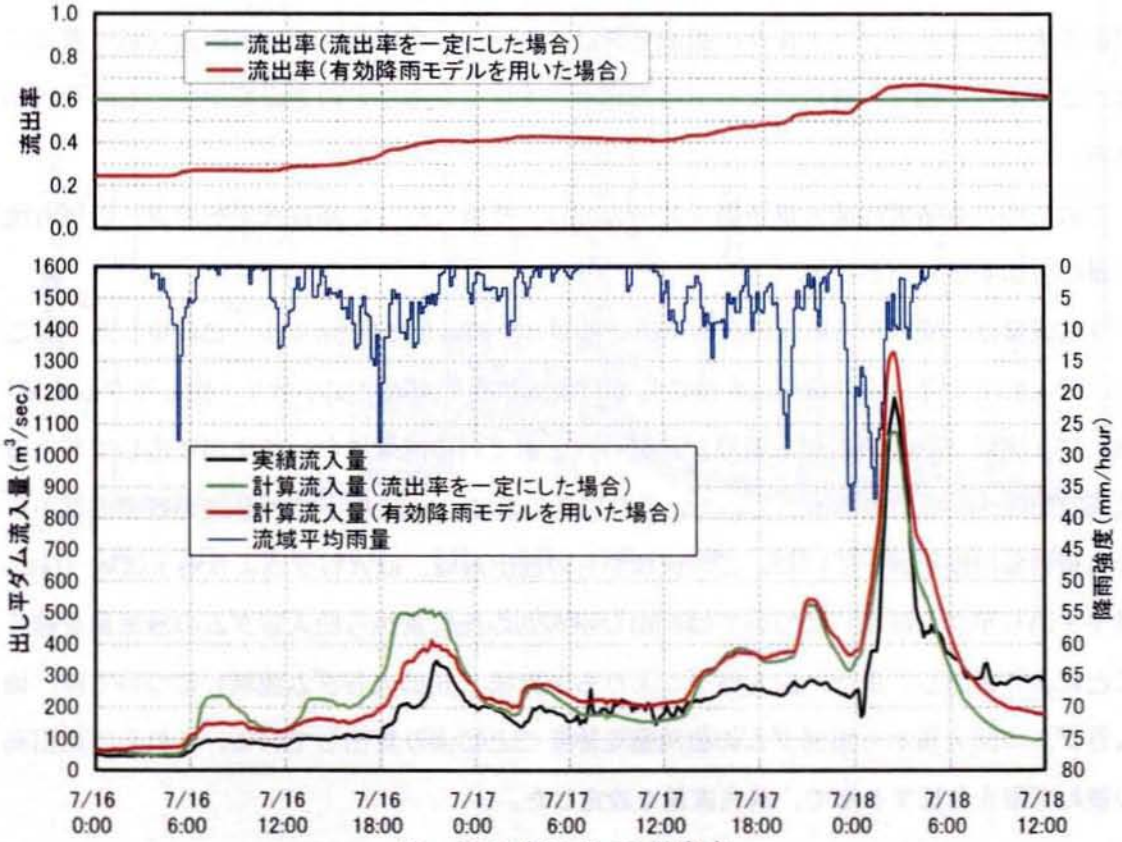
その他の設定として、斜面モデルでは Manning の粗度係数 n：0.3（m-sec）、表面流の定数 m：1.667、表土層の透水係数 k：0.015（m/sec）、表土層空隙率γ：0.25、表土層厚 D：0.05（m）を用い、また、後述する方法によって融雪の影響を考慮している。

図-4.3.11 によると、出水(a)、(b)とも、流出率を一定にすると、降雨の初期は計算流量が実際に比べ大きめとなっていることがわかる。この流出率を一定にしたケースの流出率 0.6 という設定は、ピーク流量の整合性を重視した設定であり、逆に、出水初期の整合性や出水全体の総流出量の整合性を重視して流出率を設定すると、ピーク流量の計算値は実際に比べ小さくなる。

しかし、有効降雨モデルを導入することにより、流出率を一定にする場合に比べ、計算の再現性が改善されていることがわかる。



(a)　2004 年 5 月 17 日出水



(b)　2004 年 7 月 18 日出水

図-4.3.11　有効降雨モデル導入の効果

４．３．４　融雪に伴う基底流量の考慮

本研究で対象流域としている黒部川流域はわが国有数の豪雪地帯であり、このため河川は春から夏にかけて融雪の影響を受け、例えば 7 月頃までは無降雨の日が続いてもかなりの量の基底流量が見られる。このような融雪の影響を厳密に評価するためには、流域における積雪の分布状況を常時把握し、融雪量を精度良く予測する必要がある。また、そのための観測設備等も必要となる。

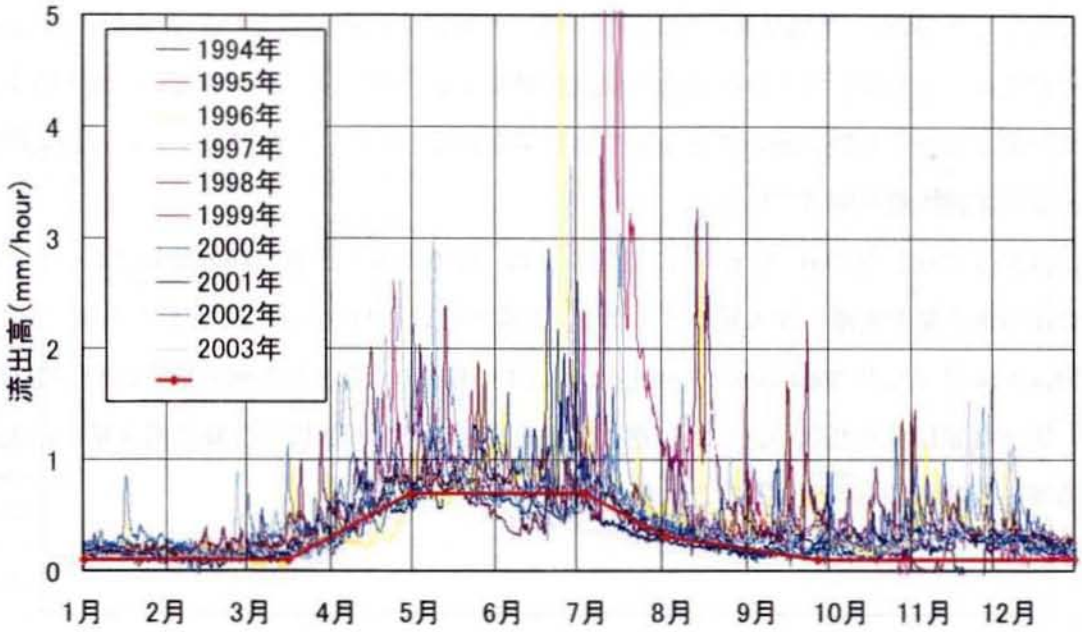
一方、春期の融雪出水を除き、梅雨期や台風期に発生する大型の出水の予測に重点をおく本研究の流入量予測システムにおいては、出水のピーク流量に対する融雪の相対的な影響は小さいと判断し、直接的な融雪量の推定計算は行っていない。

しかし、こうした融雪について、本研究の流入量予測システムは、洪水中だけでなく通常の低水時も連続的に計算を続けて出水の発生に備える必要もあることから、下記のような問題が生じる。

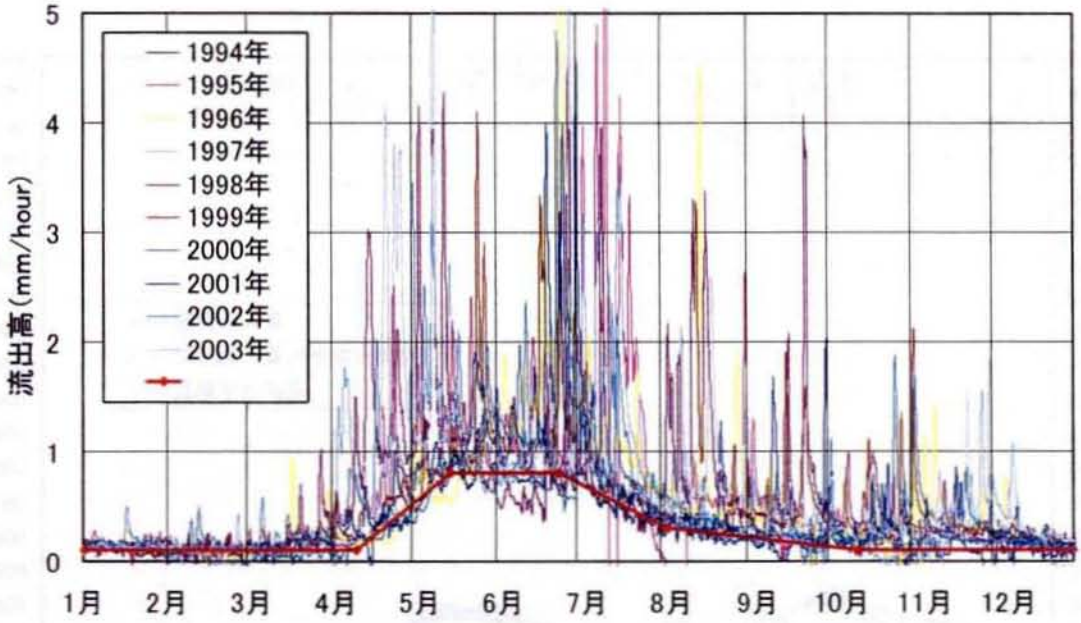
すなわち、無降雨時が続くと４．３．１～４．３．３に示したモデルでは、河道網全体において流量がゼロに近づいていく。しかし、それに対して実測流入量はある程度の流量がある場合、カルマンフィルタの観測更新は、モデルの状態量をその実測流入量に無理に合わせるように働き、場合によっては計算が不安定になるなどの悪影響が生じるおそれがある。

このため、本研究の流入量予測システムでは、季節に応じた基底流量を河道への側方流入量に付加するものとした。

基底流量は、流域からの流出高の実績に基づき、図-4.3.12 に示すように設定した。ここに、図-4.3.12 では、仙人谷ダムを境にして対象流域を下流域（(a)小屋平・出し平ダム流域）および上流域（(b)仙人谷ダム流域）に分け、それぞれの流域において季節に応じて与える基底流出高を、赤い線で示している。それ以外の線は、1994 年～2003 年における流域からの実績の流出高を表している。この流域からの流出高は、仙人谷ダムよりも下流域（(a)小屋平・出し平ダム流域）については、出し平ダムの流入量から仙人谷ダムの放流量を除くことにより算出し、また、仙人谷ダムよりも上流域（(b)仙人谷ダム流域）については、仙人谷ダムの流入量から黒部ダムの放流量を除くことにより算出している。これらの流出高の概ね下限を包括する形で、基底流量を設定した。



(a)　小屋平ダム・出し平ダム流域



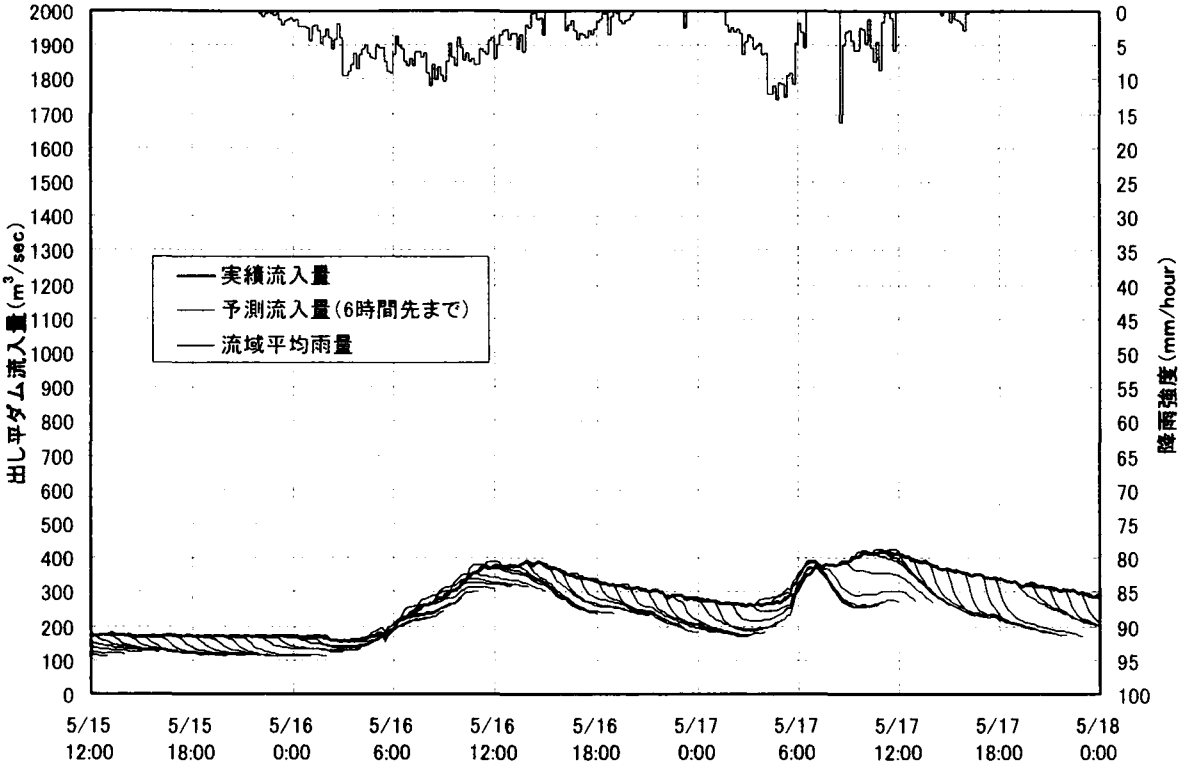
(b)　仙人谷ダム流域

図-4.3.12　基底流量の設定

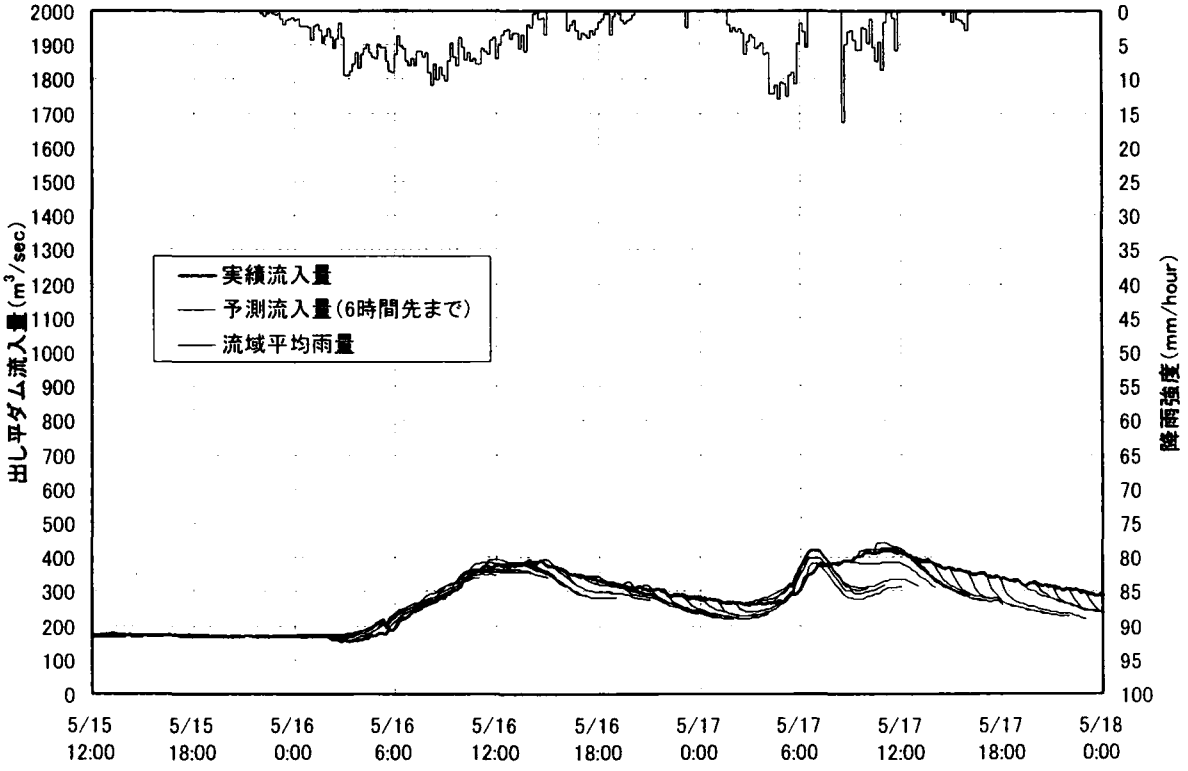
図-4.3.12 に示した基底流量を、４．３．１～４．３．３で述べたモデルに付加して流出計算を行った場合と、付加せずに流出計算を行った場合の比較を図-4.3.13、図-4.3.14 に示す。この結果は、カルマンフィルタによる実測流量のフィードバックを行いながら毎正時を起点に予測した将来６時間分の流入量の予測結果を表している。予測計算における将来時刻の雨量は実測雨量を用いている。

図-4.3.13 に示した 2004 年 5 月 17 日出水では、出水の立ち上がり前の部分において、計算による流入量が実績の流入量に近くなり、計算が改善されていることがわかる。

図-4.3.14 に示した 2004 年 7 月 18 日出水では、出水の立ち上がり前の部分においてもあまり大きな差は見られない。しかし逆に、基底流量の付加が原因で計算の流入量が過大になる等の不具合も生じていないことがわかる。

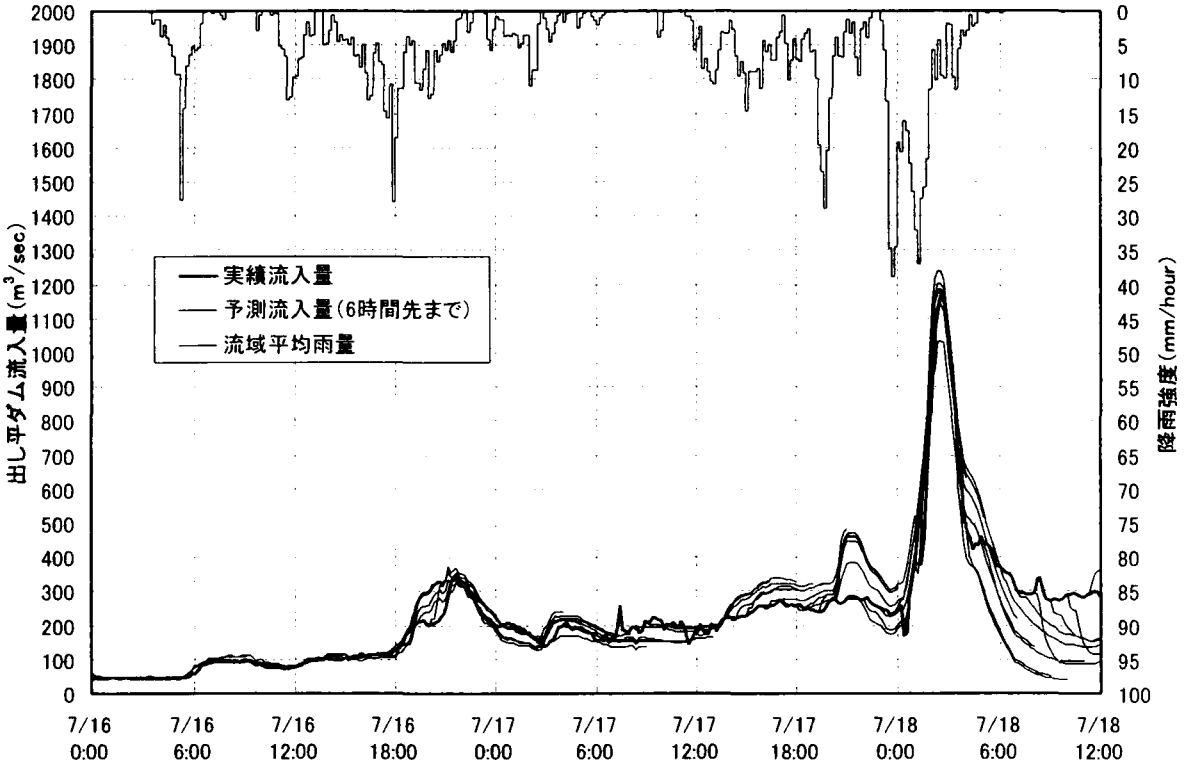


(a)　基底流量を付加しない場合

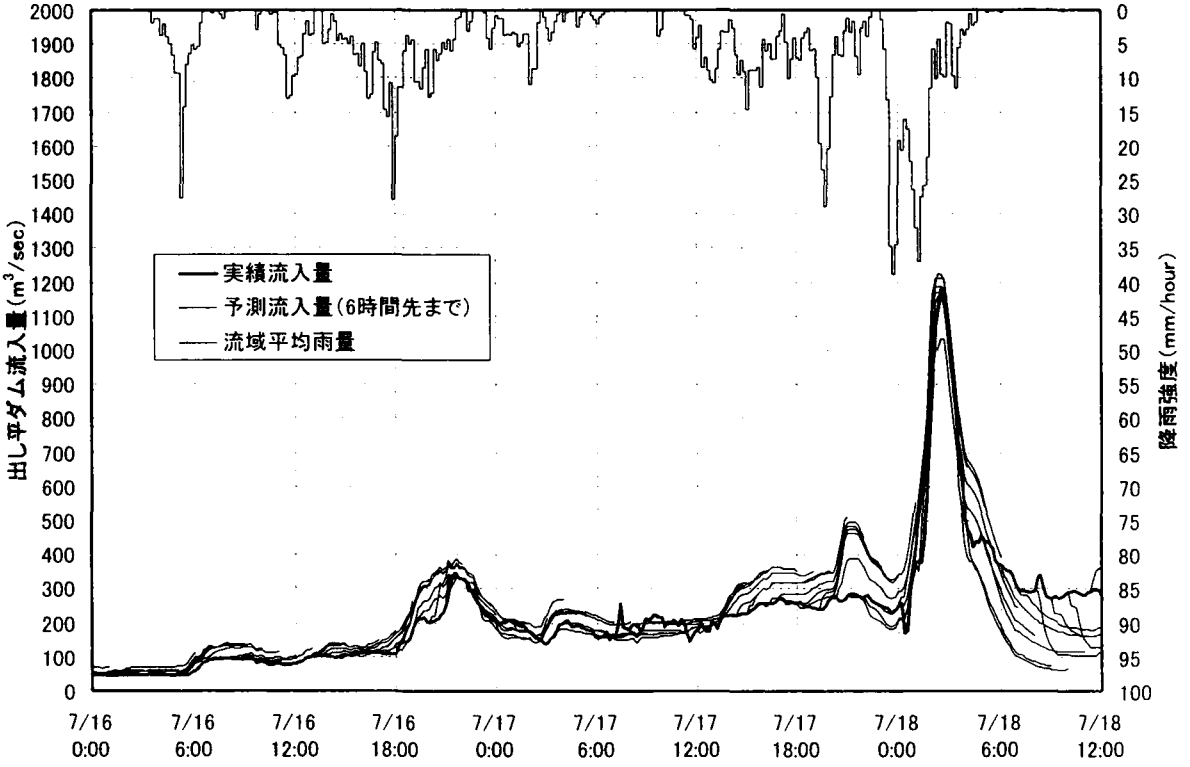


(b)基底流量を付加した場合

図-4.3.13　基底流量導入の効果（2004 年 5 月 17 日出水）



(a)　基底流量を付加しない場合



(b)　基底流量を付加した場合

図-4.3.14　基底流量導入の効果（2004 年 7 月 18 日出水）

４．４　分布型流出モデルに基づく実時間流出予測モデルの精度検証

４．４．１　対象流域の概要

流入量予測システムの対象とするダムは、黒部峡谷に位置する関西電力出し平ダム、小屋平ダム、仙人谷ダムである。上流には、同じく発電専用ダムである黒部ダムがあるが、下流の３ダムと異なり貯水容量が大きく、通常、洪水を貯め込む操作が行われるため、流出計算を行う対象流域は黒部ダムよりも下流とした（流域面積 272.7km^2）。

流域はきわめて急峻な山岳地帯であり、人家、田畑等は無い。流域内には、図-4.4.1 に示すとおり、5 つの発電所があり、黒部川に対して取水、放水を行っている。

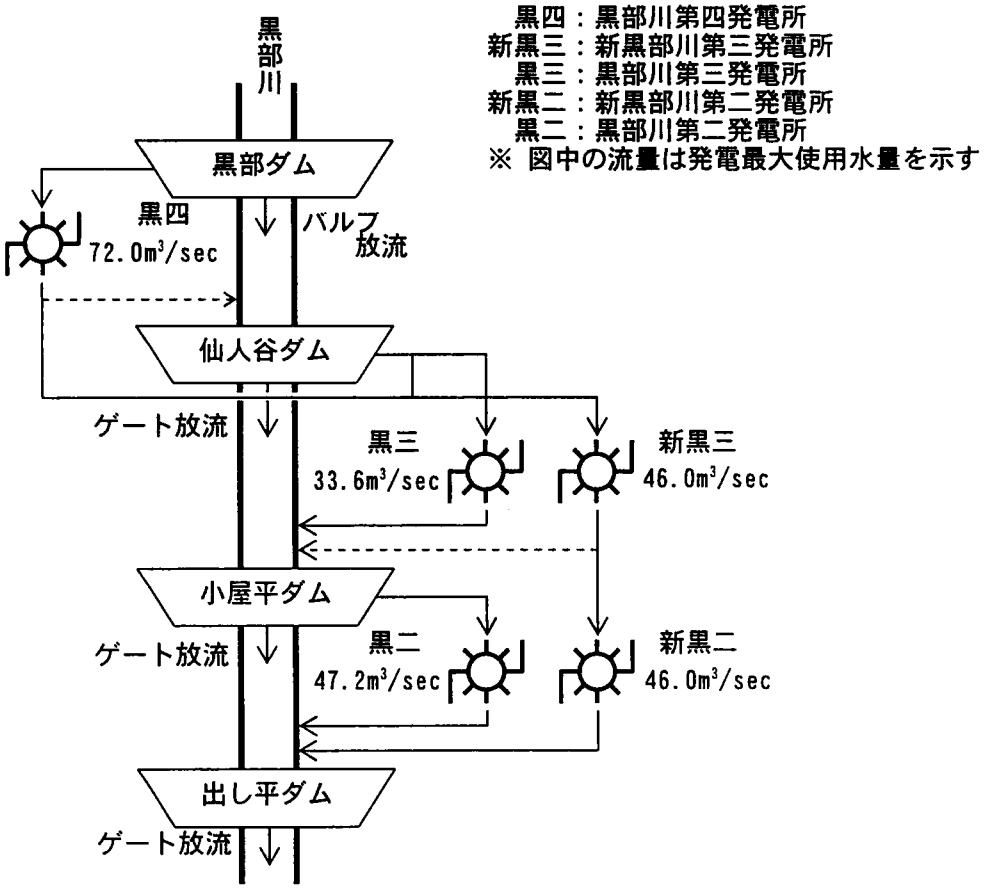


図-4.4.1　出し平ダム上流の発電所系統図

４．４．２　流出予測計算結果

（１）黒部川流域への適用

第３節に示した流出予測計算モデルにより、流出予測シミュレーションを行う。

対象流域を、図-4.4.2 に示すように、45 個の部分流域に分割した。この流域分割は、雨量データの空間分解能を生かすべく、各部分流域の面積が雨量データのグリッドのサイズ（2.5km×2.5km）と同程度になるようにしている。

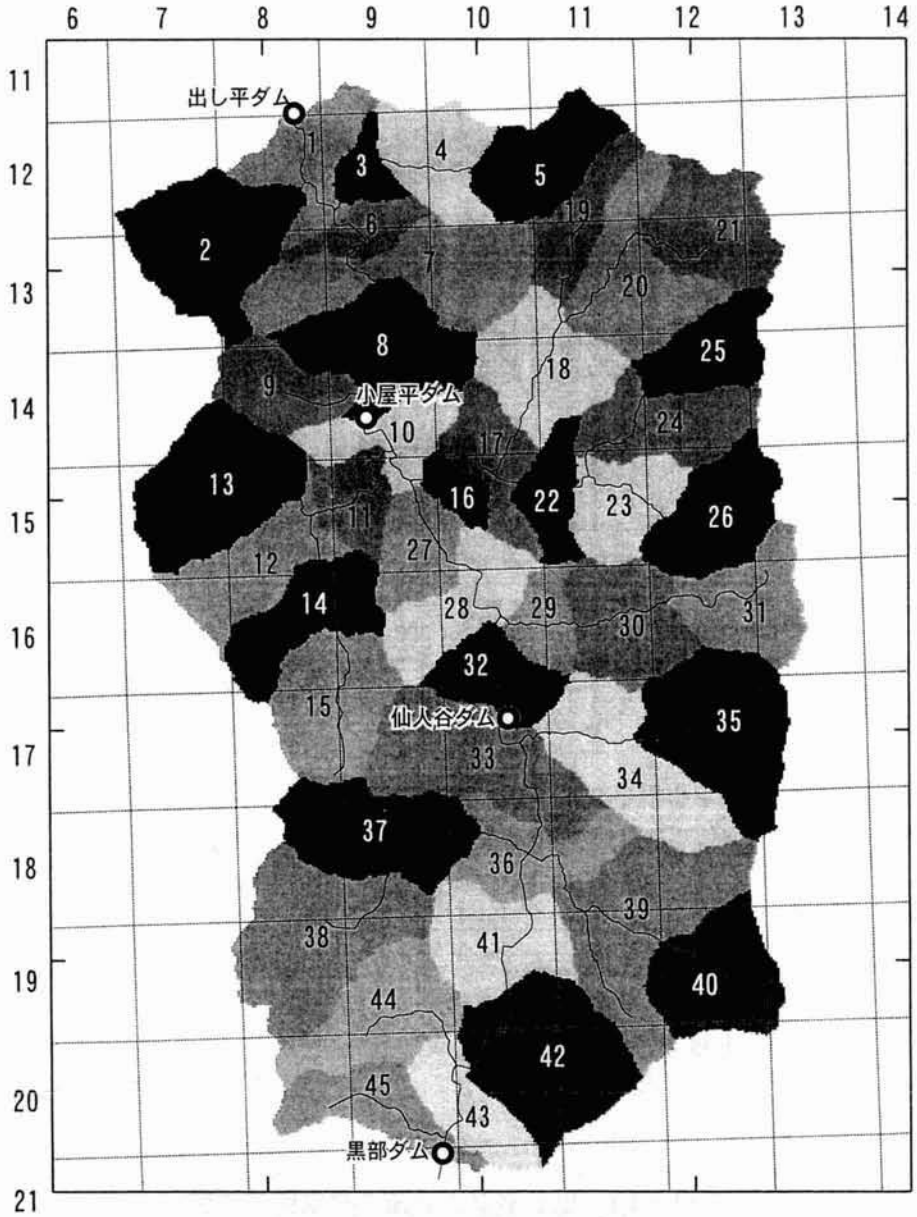


図-4.4.2　対象流域の流域分割

斜面モデルである、集中化された表面流・中間流統合型 kinematic wave モデルのパラメータは、Manning 則の適用により m については m＝1.667 とし、また、その他のパラメータは流出計算結果が実績流入量に合うよう設定するものとした。本研究の対象流域は、1/25,000 地形図において都市域や水田およびその他の農地がなく、土地利用がほぼ一様（山林）と見なせることから、パラメータは流域全体で一律の値を用いるものとし、市川ら[19]が用いている値（Manning の粗度係数 n：0.3（m-sec）、表面流の定数 m：1.667、表土層の透水係数 k：0.015（m/sec）、表土層空隙率 γ：0.40、表土層厚 D：0.10（m））等を参考に、試行錯誤によりその値を同定した結果、n：0.3（m-sec）、m：1.667、k：0.015（m/sec）、γ：0.25、D：0.05（m）という値を用いるものとした。

河道モデルである、河道網集中型 kinematic wave モデルのパラメータのうち、河川断面形状については式(4.3.14)により径深 R と通水断面積 A の関係を表すものとし、河川断面形状が得られないため、図-4.4.3 に示す断面形状を仮定し、全川、K_1 = 0.150、Z = 0.600 という定数を用いるものとした。

河道における Manning の粗度係数は、n＝0.050 とした。粗度係数の設定にあたっては、図-4.4.4 に示すように、粗度係数の値を変えて数ケースの計算を試み、上流ダムの放流量が下流ダムに伝播する速さが実際の現象に近くなるような値を求めた。

カルマンフィルタ導入に当たり、システムノイズの設定は、式(4.3.36)における係数 a：1.0（mm/hour）、式(4.3.35)における時定数 τ：18,000（sec）とした。

a = 1.0（mm/hour）という設定は、各部分流域において側方流入量に流出高換算で 1.0mm/hour 程度の誤差があり得るという考慮をすることに相当する。

時定数 τ = 18,000（sec）という設定は、半減期で表すと 12,476.65（sec）（≒ 3.5（hour））である。

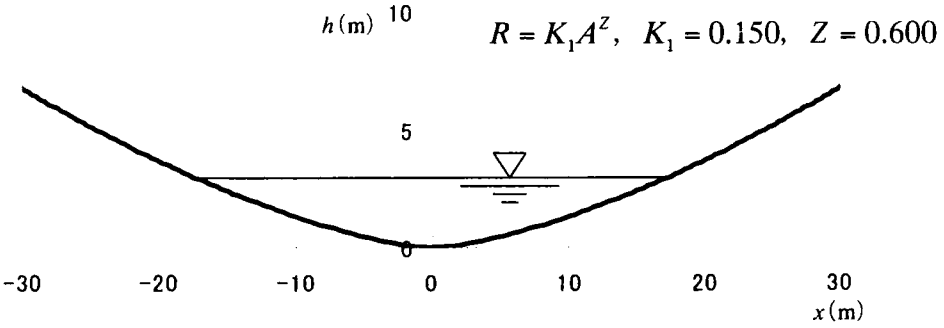


図-4.4.3　仮定した河道断面形状

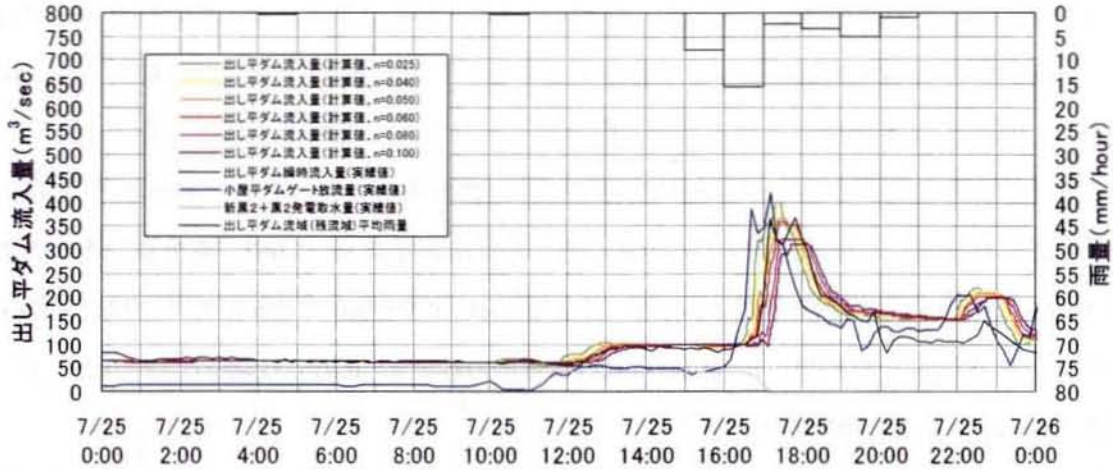


図-4.4.4　河道の粗度係数に関する検討の例

また、システムノイズの共分散行列については、(4.3.35) 式における白色ノイズ $w^J(t)$が、部分流域どうしで相関を持つものとし、

$$E\left\{w^{J_1}(t)\,w^{J_2}(t)\right\} = \exp\left(-\frac{d_{J_1J_2}}{10}\right) \tag{4.4.1}$$

とした。ここに、d_{J1J2}：流域 J_1、J_2 の重心間の距離（km）である。すなわち、流域間の距離が近いほど、それらの流域のノイズは高い相関があると仮定している。この設定を図示すると、図-4.4.5 のとおりである。

観測ノイズの共分散行列 R_k は、

$$R_k = \begin{pmatrix} 5.0^2 & 0 & 0 \\ 0 & 5.0^2 & 0 \\ 0 & 0 & 5.0^2 \end{pmatrix} \qquad ((\mathrm{m^3/sec})^2)$$

とした。すなわち、ダムの流入量の観測データは３ダムとも 5.0m³/sec 程度の誤差があり得るものであり、また、ダムどうしでその誤差に相関はないという考慮をしていることに相当する。

上記の各種パラメータ設定も、斜面の流出モデルパラメータと同様に、流出計算結果が実績流入量に合うようにするということを考慮し、若干の試行錯誤を経て設定したものである。

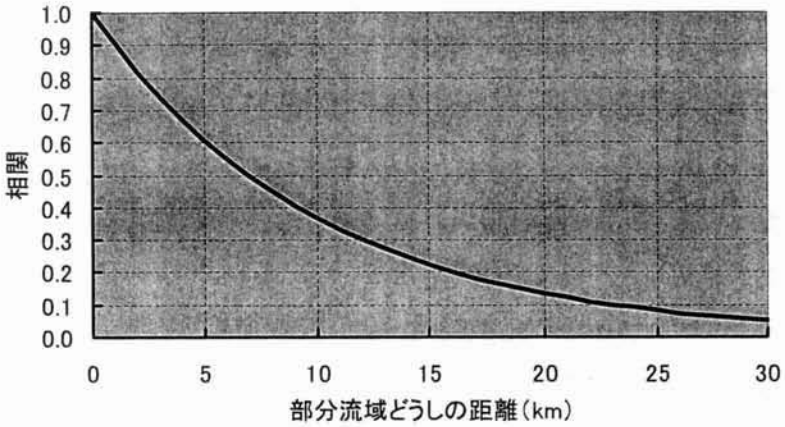


図-4.4.5　部分流域どうしのシステムノイズの相関の設定

（２）計算結果および精度検証

以上の諸設定により、流出予測シミュレーションを行う。ただし、ここでは、雨量予測の誤差の影響の無い、流出予測計算自体の精度を検証するため、実測の雨量値を予測雨量として用いて、流出予測シミュレーションを行うものとする。対象とした出水は、以下のとおりである。

①2004 年 5 月 17 日出水

②2004 年 7 月 18 日出水

③2004 年 8 月 31 日出水

④2005 年 6 月 28 日出水

これらの出水の予測シミュレーション結果をそれぞれ図-4.4.6～図-4.4.9 に示す。各図において、グラフ(a)は、毎正時を起点に算出した、将来 6 時間分の出し平ダムの予測流入量を表している。また、グラフ(b),(c),(d)は、10 分毎に、その時刻を起点とする将来 6 時間分の流入量予測を行い、その算出された予測流入量のうちそれぞれ 2, 4, 6 時間先の流入量を抽出してプロットしたものである。

なお、出し平ダムの将来 6 時間分の予測流入量を計算するためには、入力データとして、将来 6 時間分の雨量、上流ダム放流量、上流発電所の発電使用水量、気温のデータが必要となる。これらについて、本シミュレーションでは、下記のように与えた。

①雨量 ： 該当する時刻の実測の雨量値を用いる。

②ダム放流量の将来値（黒部ダムバルブ放流量）

： 該当する時刻の実績の放流量を用いる。

③ダム放流量の将来値（仙人谷ダム・小屋平ダム）

：ダム放流量＝各ダム流入量の予測値―各ダムから取水する発電使用水量の将来値

④発電使用水量の将来値（黒四発電所）

：該当する時刻の実績の発電使用水量を用いる。

⑤発電使用水量の将来値（黒四以外の発電所）

：該当する時刻の実績の発電使用水量を用いる。

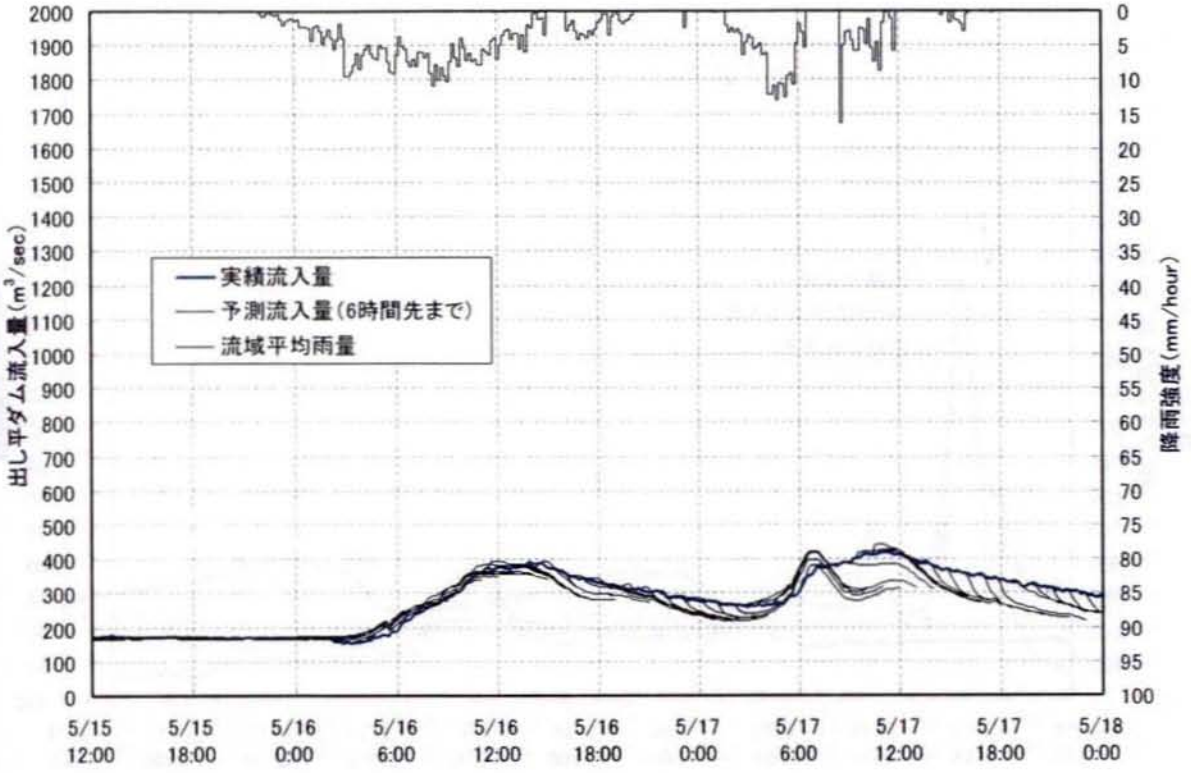
⑥気温　：該当する時刻の実績の気温を用いる。

図-4.4.6～図-4.4.9 の各図より、本モデルは、出水波形の再現性がよく、特に出水の立ち上がり、ピーク値について良好な予測精度を確保していると評価できる。

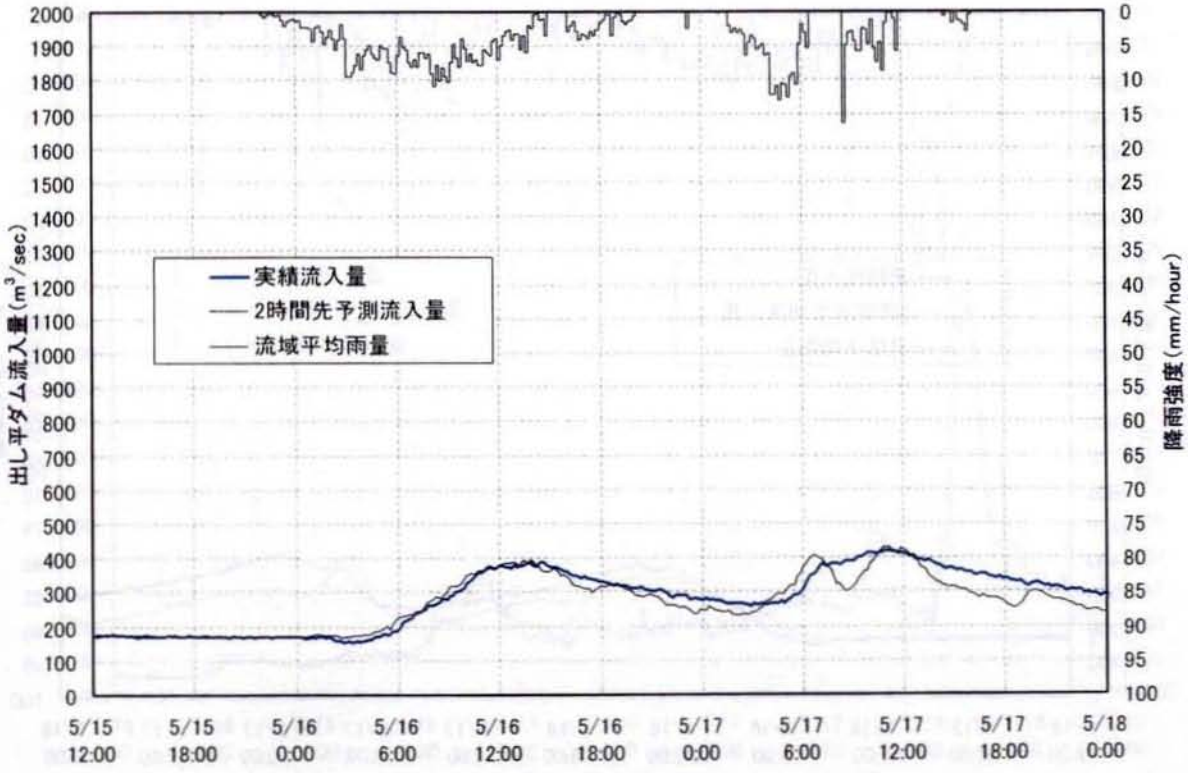
ただし、グラフを詳細に見ると、出水の立ち上がりに比べ、ピーク流量発生後に逓減していく場合に、やや流量が落ち込みすぎる予測を行う傾向があることがわかる。

この原因として、斜面の流出計算モデルの設定に改善の余地があることが考えられる。すなわち、本システムではダム操作の支援という観点から、洪水の立ち上がり部分の予測が実際の波形よりも遅れないことを重視して、流出モデルを設定しており、全体的な精度を重視する設定も別途ありうると考えられる。

また、ダム流入量の実測値をフィードバックさせるカルマンフィルタによる観測更新の対象を、現状の河道の流れの計算だけでなく斜面の流出計算まで広げることにより、予測精度向上を図ることができる可能性もあり、これは今後の課題である。



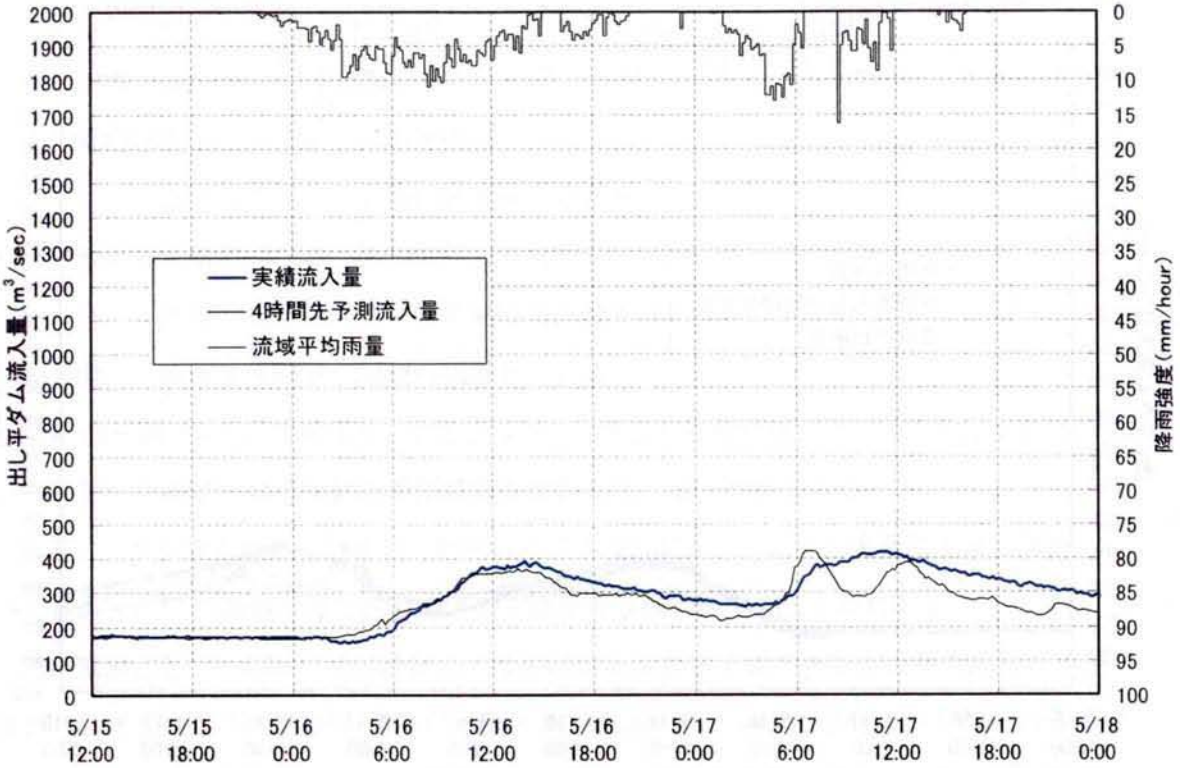
(a)　6時間先までの予測グラフ（毎正時起点）



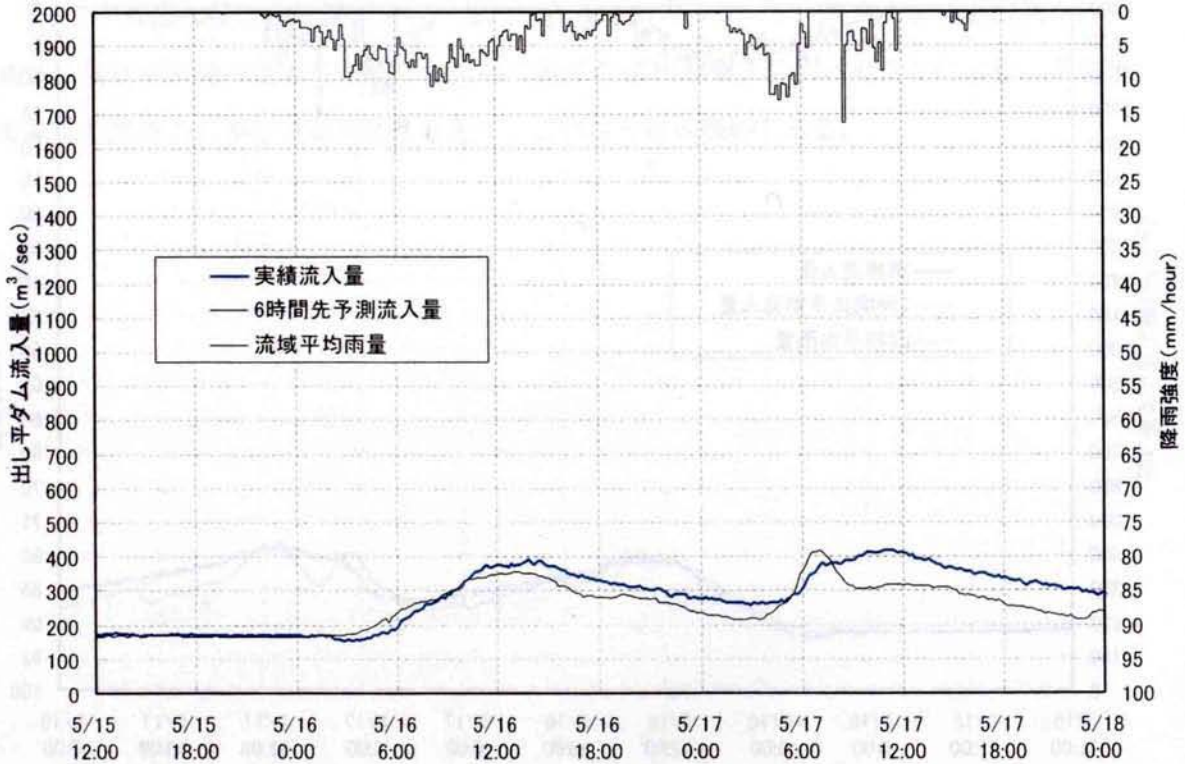
(b)　2時間先予測値のグラフ

図-4.4.6　流入量予測計算結果（2004年5月17日出水）

（将来時刻雨量：実績値、黒部バルブ：実績値、黒４取水量：実績値）



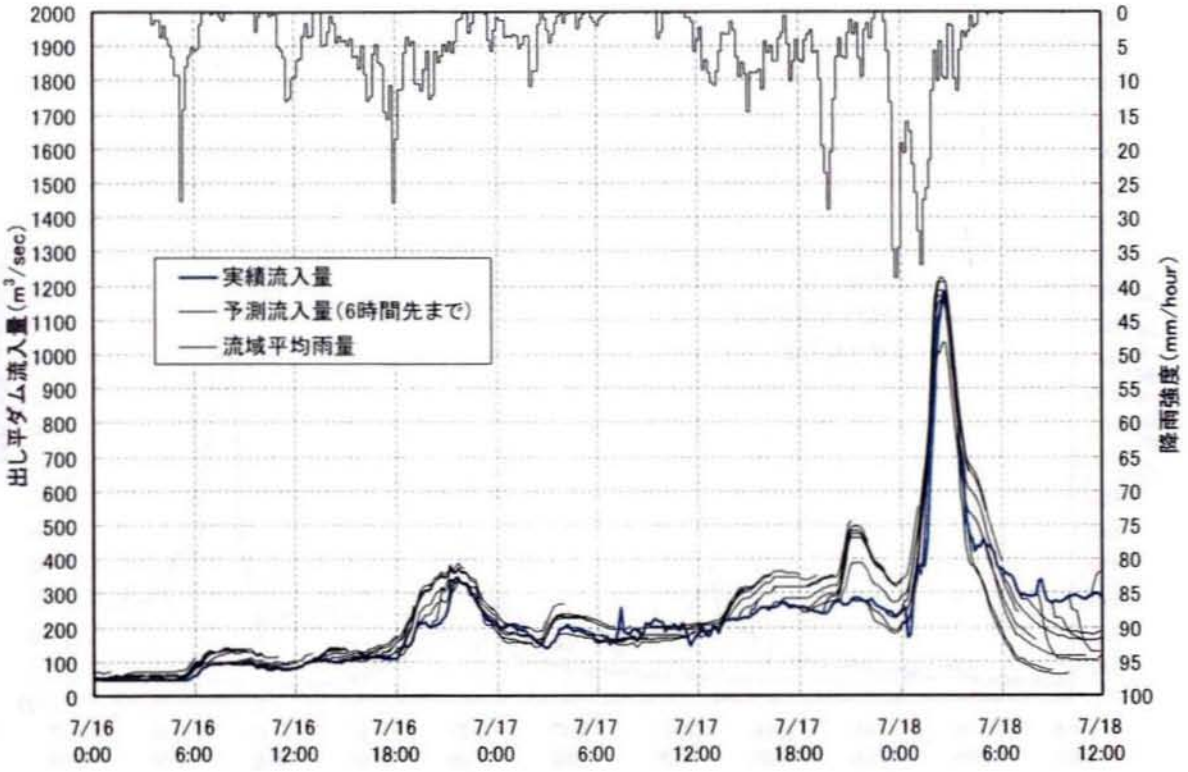
(c)　４時間先予測値のグラフ



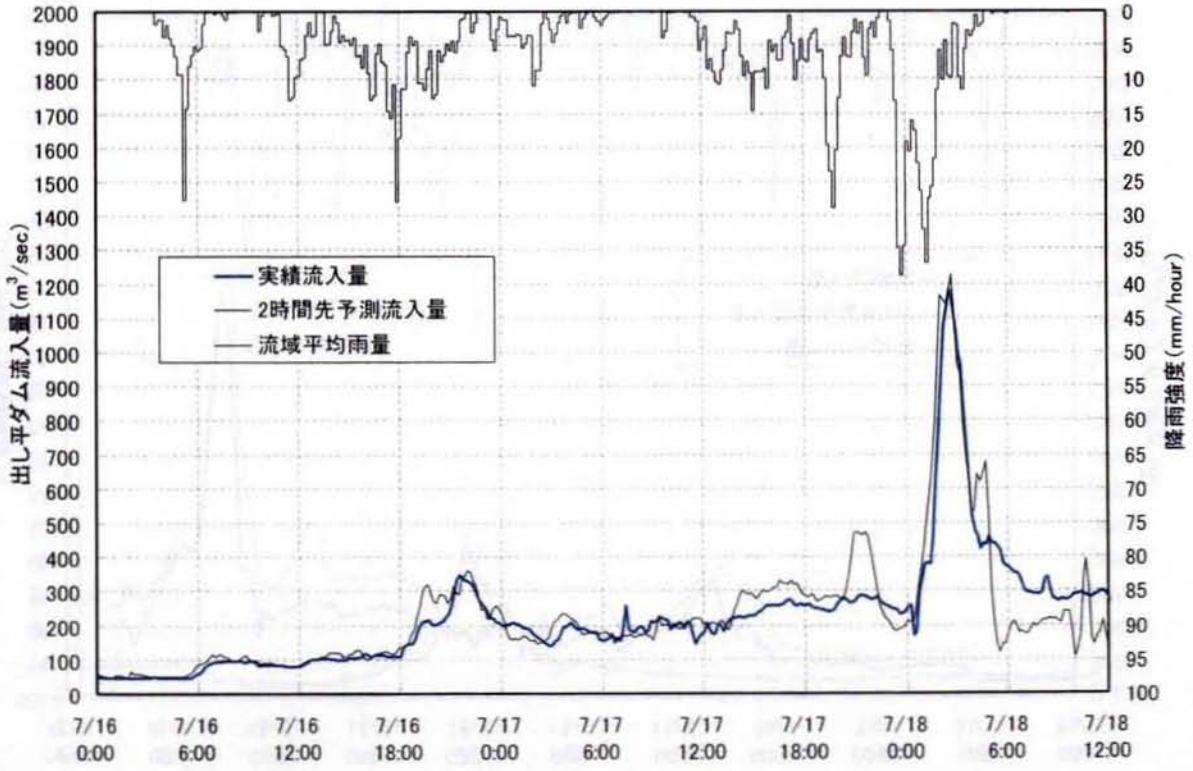
(d)　６時間先予測値のグラフ

図-4.4.6　流入量予測計算結果（2004 年 5 月 17 日出水）

（将来時刻雨量：実績値、黒部バルブ：実績値、黒４取水量：実績値）



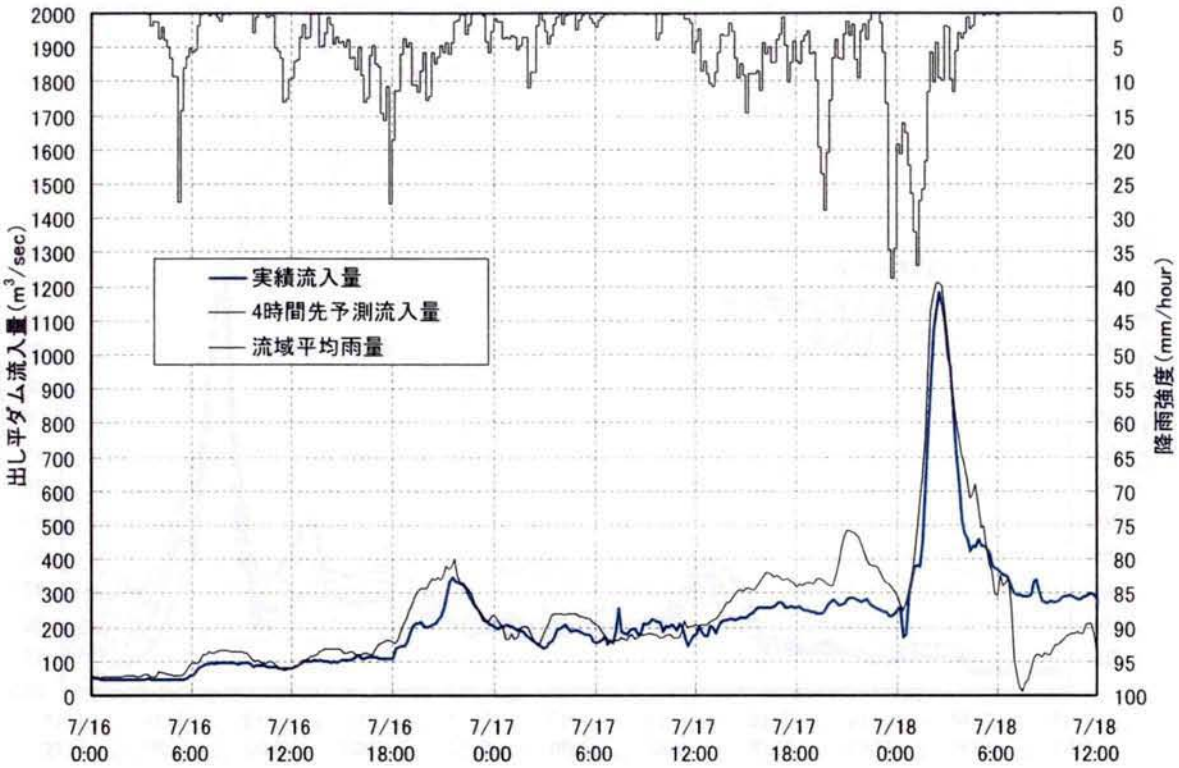
(a)　６時間先までの予測グラフ（毎正時起点）



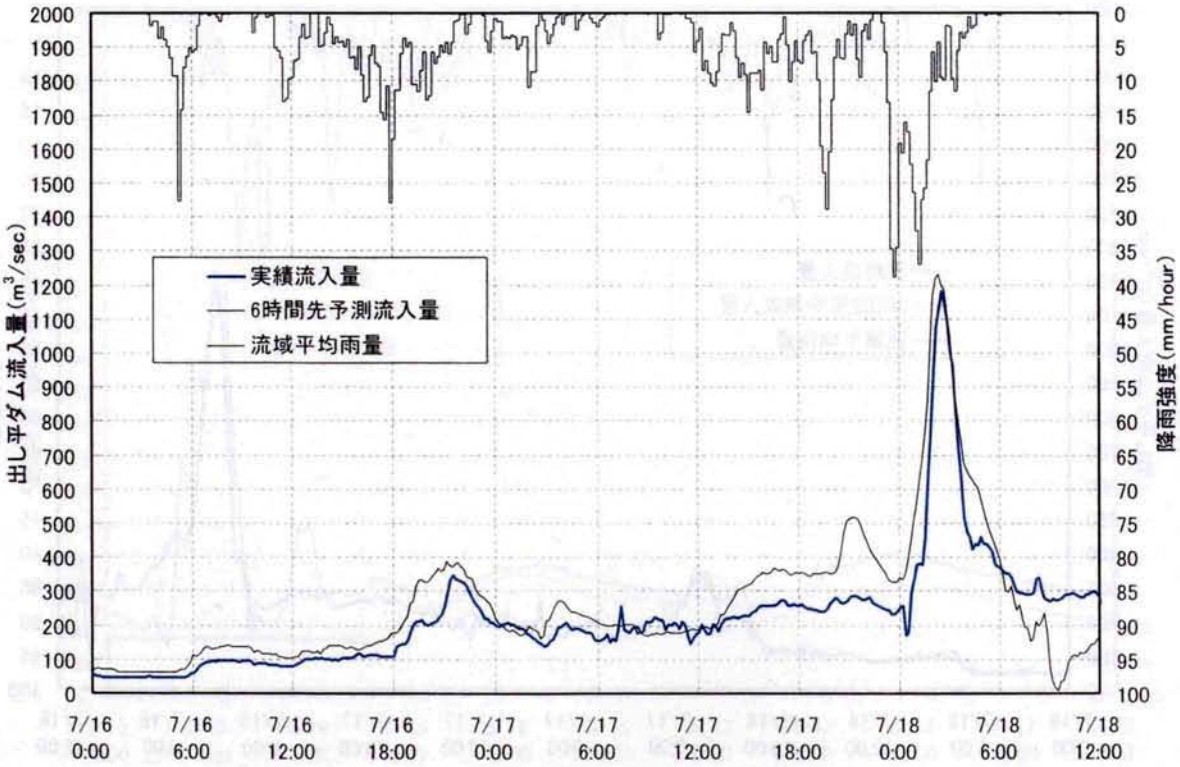
(b)　２時間先予測値のグラフ

図-4.4.7　流入量予測計算結果（2004 年 7 月 18 日出水）

（将来時刻雨量：実績値、黒部バルブ：実績値、黒４取水量：実績値）



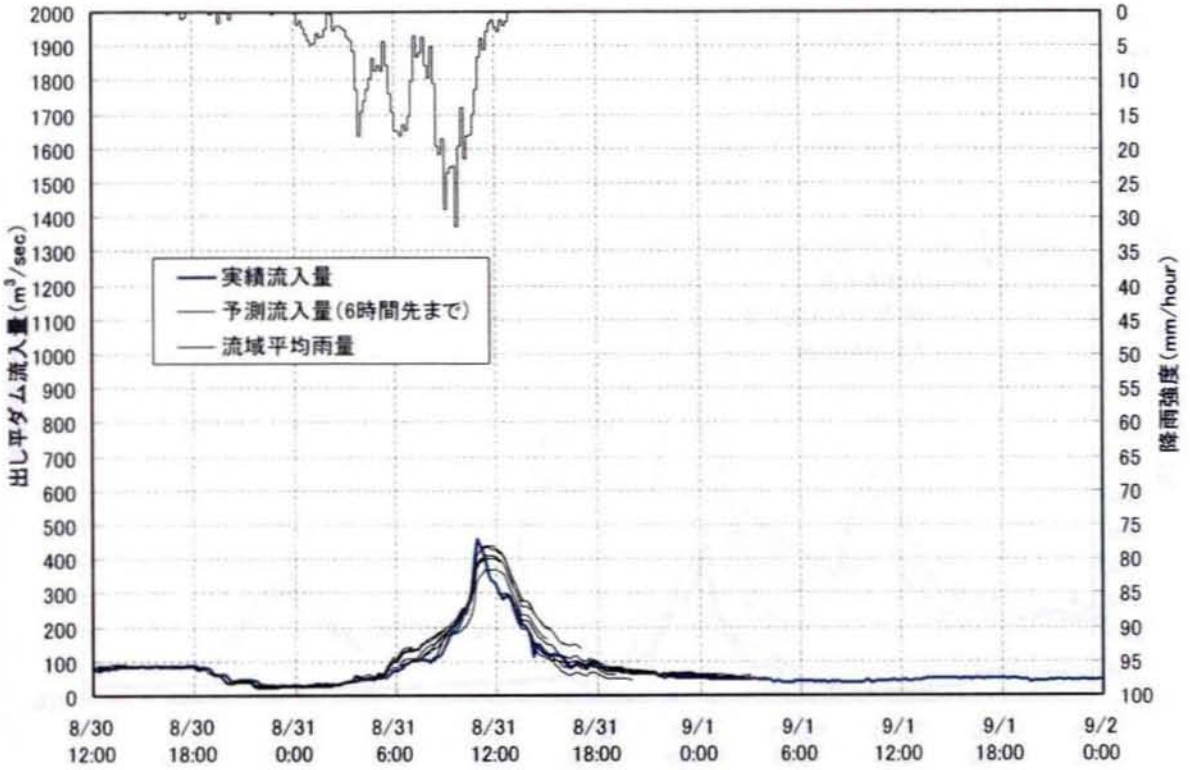
(c)　４時間先予測値のグラフ



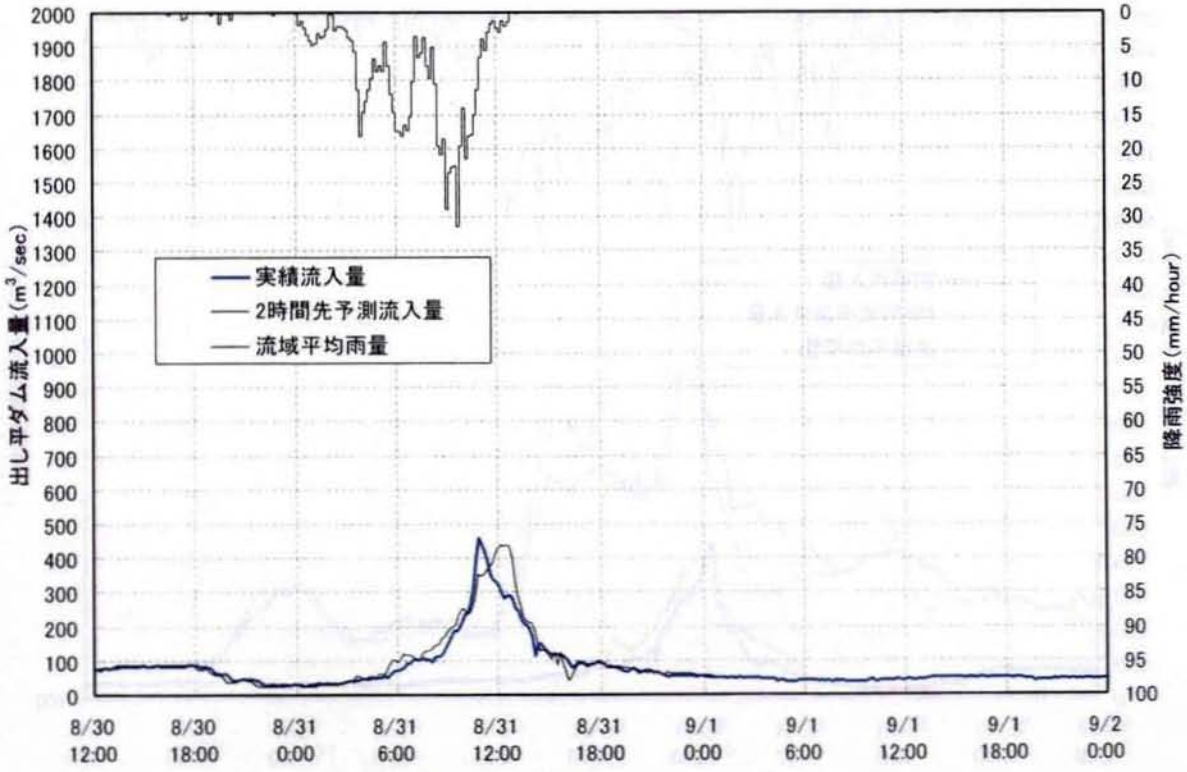
(d)　６時間先予測値のグラフ

図-4.4.7　流入量予測計算結果（2004 年 7 月 18 日出水）

（将来時刻雨量：実績値、黒部バルブ：実績値、黒４取水量：実績値）



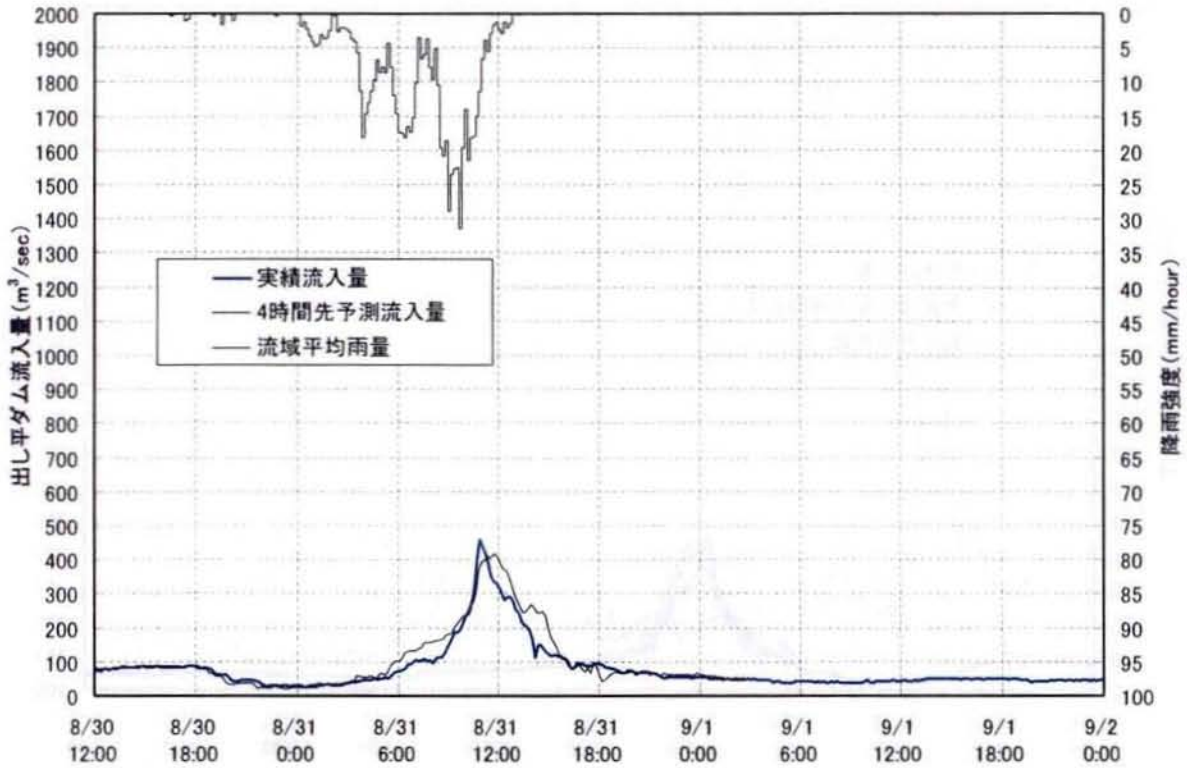
(a)　6時間先までの予測グラフ（毎正時起点）



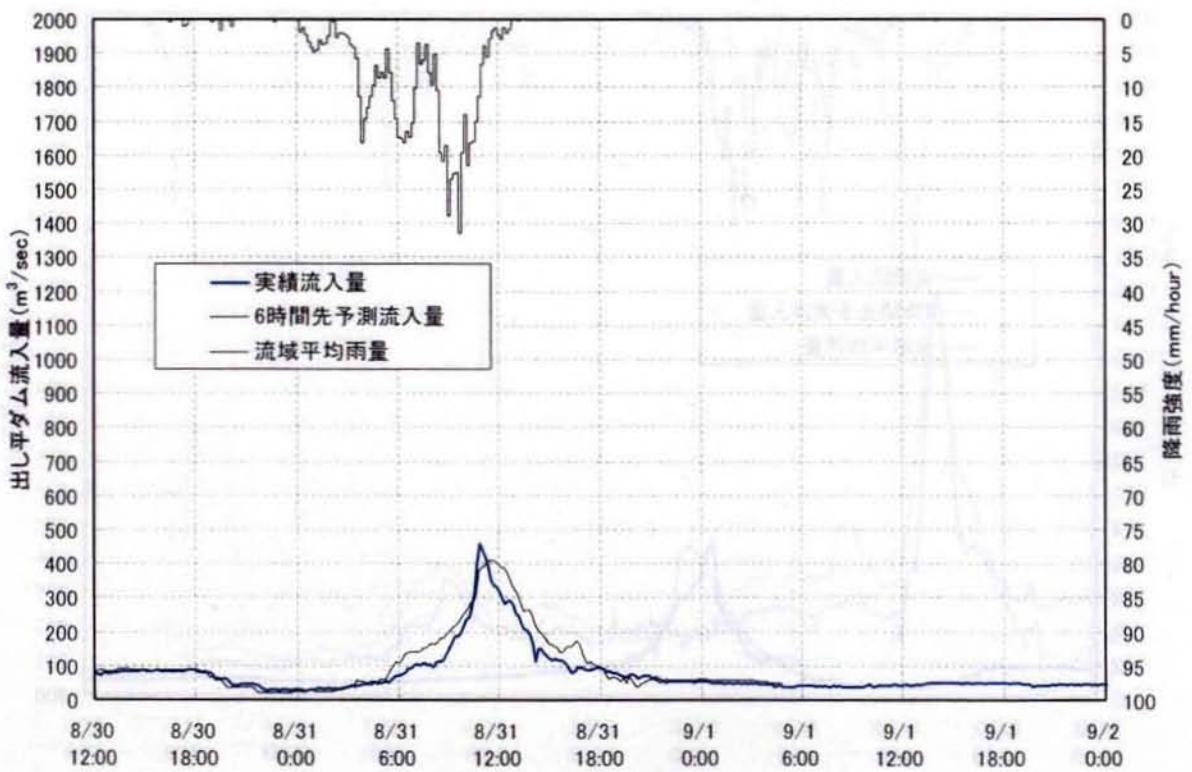
(b)　2時間先予測値のグラフ

図-4.4.8　流入量予測計算結果（2004年8月31日出水）

（将来時刻雨量：実績値、黒部バルブ：実績値、黒4取水量：実績値）



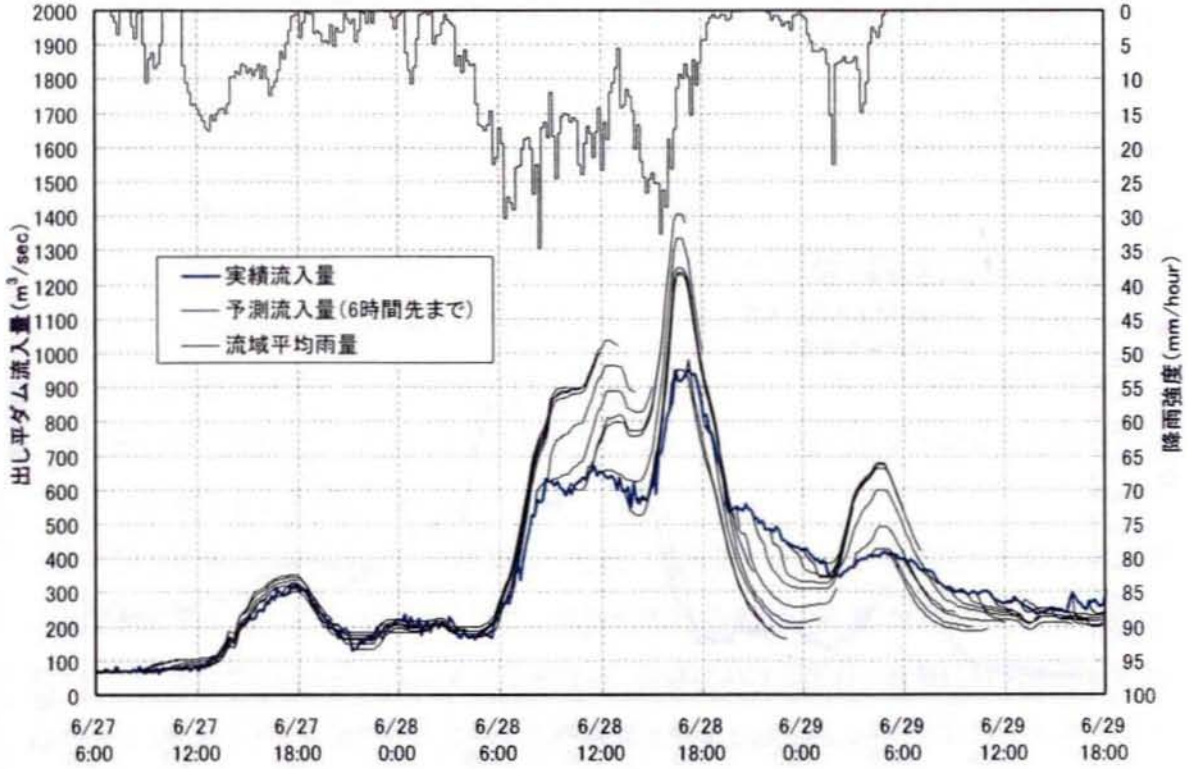
(c)　４時間先予測値のグラフ



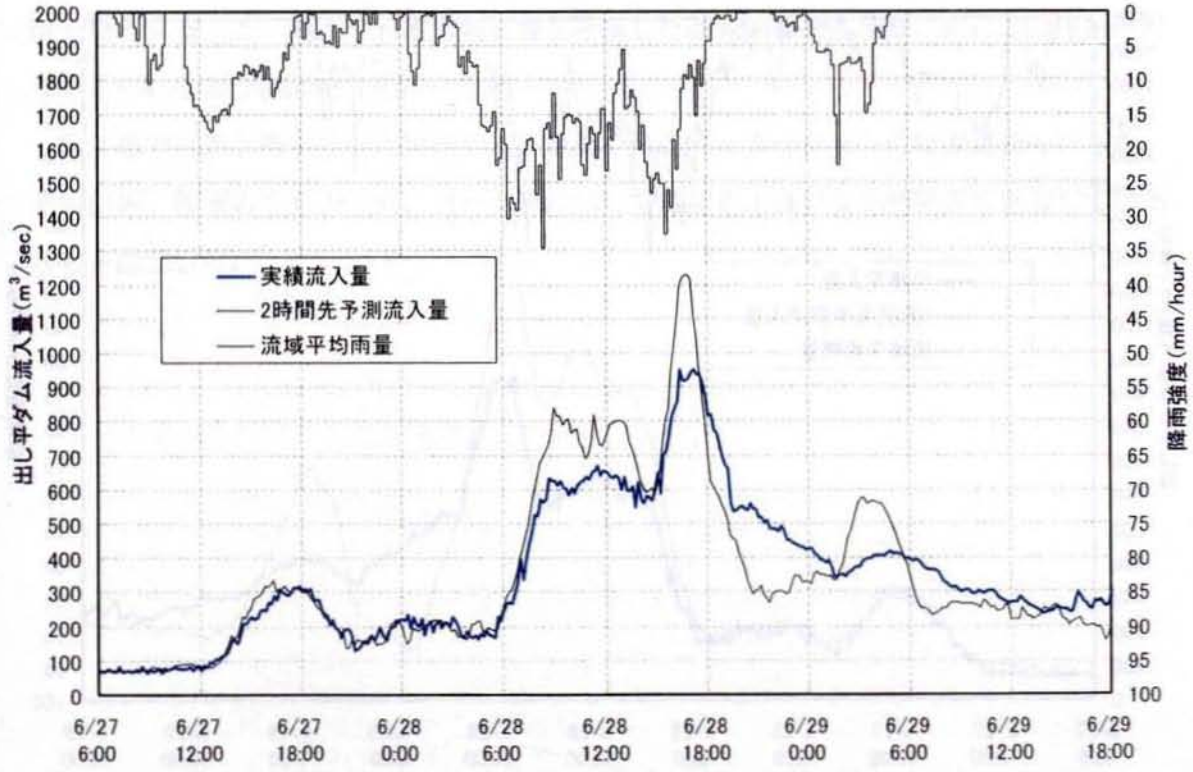
(d)　６時間先予測値のグラフ

図-4.4.8　流入量予測計算結果（2004 年 8 月 31 日出水）

（将来時刻雨量：実績値、黒部バルブ：実績値、黒４取水量：実績値）



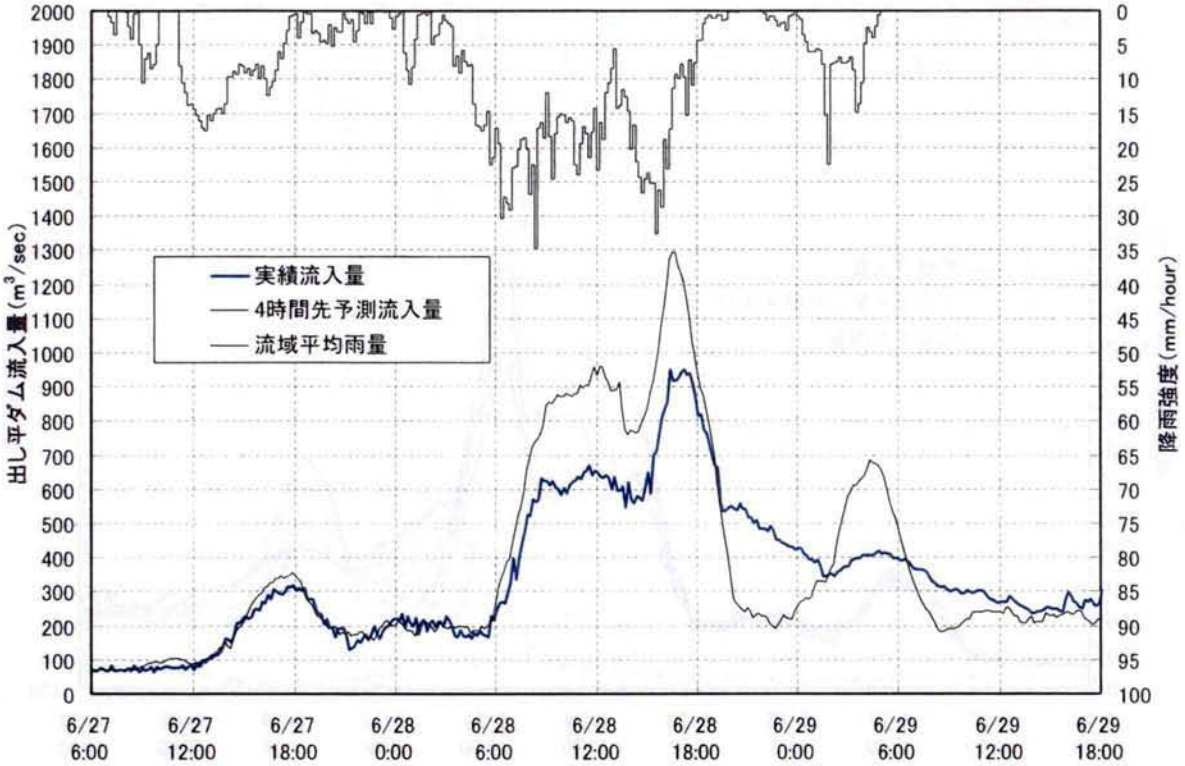
(a)　６時間先までの予測グラフ（毎正時起点）



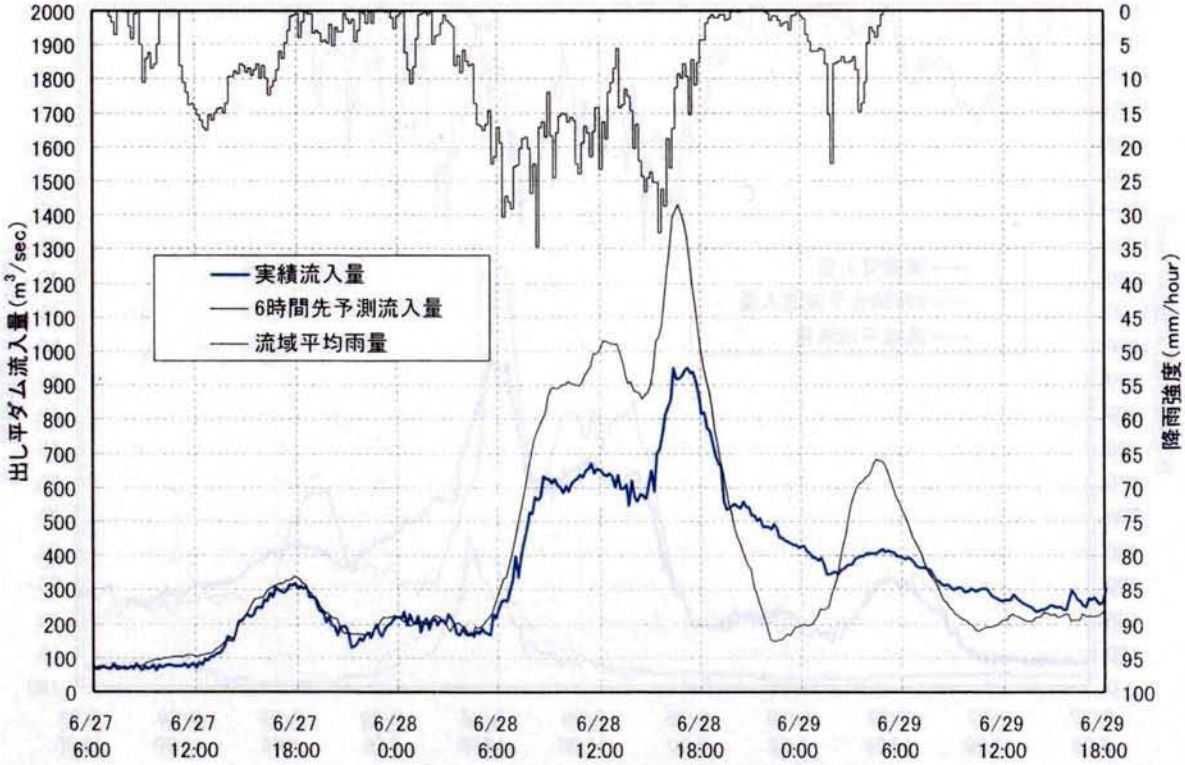
(b)　２時間先予測値のグラフ

図-4.4.9　流入量予測計算結果（2005 年 6 月 28 日出水）

（将来時刻雨量：実績値、黒部バルブ：実績値、黒４取水量：実績値）



(c)　４時間先予測値のグラフ



(d)　６時間先予測値のグラフ

図-4.4.9　流入量予測計算結果（2005 年 6 月 28 日出水）

（将来時刻雨量：実績値、黒部バルブ：実績値、黒４取水量：実績値）

４．５　結語

本章では、第３章に述べた降雨予測値を入力値として用いることを前提とした、ダム流入量を予測する手法を構築した。

メッシュ形式の雨量データが有する空間的な降雨の分布状況の情報をいかして、また、山岳域における地形の影響を考慮した流出計算を行うため、分布型の流出モデルをベースにした河川流量の計算を行うものとした。また、ダムにおいて得られる流入量の実測データを流出計算に適切にフィードバックさせられるように、河道のモデルに対してカルマンフィルタを適用するものとした。

第２節で従来の流量予測について概観した後、第３節において、本研究におけるダム流入量予測システムの計算手法を示した。斜面における流出の計算には集中化された表面流・中間流統合型 kinematic wave モデルを用い、河道における流れの計算には河道網集中型 kinematic wave モデルを用いた。このうち河道網集中型 kinematic wave に対してカルマンフィルタを適用し、ダムにおいて得られる流入量の実測値の情報を適切に計算にフィードバックできるモデルを構築した。さらに、累加雨量に応じて流出率を変化させながら有効降雨を算定すること、および、融雪の影響を考慮した基底流量を与えることにより、実運用に耐えられるよう精度向上を図った。

第４節では第３節で述べた手法による流出予測シミュレーションの精度評価を行った。その結果、出水の立ち上がり、ピーク値について実運用上良好な予測精度を保有していることを確認した。

第４章　参考文献

1) 橋本徳昭，藤田 暁，椎葉充晴，立川康人，市川 温：分布型流出モデルに基づくダム流入量予測システムの構築，水工学論文集，第 50 巻，pp.289-294，2006.

2) 橋本徳昭，片岡幸毅：電力ダムの洪水吐ゲート操作に関するシステム開発，大ダム，No.177，pp.65-75，2001.

3) Hashimoto, N. and Kataoka, K.: Development of a system for operating the spillway gate for hydroelectric dams, Proc. of ICOLD －69th Annual Meeting Dresden, Vol.I, pp.293-313, 2001.

4) 槻山敏昭，外山久典，笹原和彦，眞間修一，関 基，竹村仁志：ニューラルネットワークによる阿武隈川洪水予測の基礎的研究，河川技術論文集，第 9 巻，pp.173-178，2003.

5) 稲吉明男，長江幸平，田宮睦雄，宮田達磨，眞間修一，竹村仁志：ニューラルネットワークモデルによる二級河川での洪水予測の基礎的研究，河川技術論文集，第 9 巻，pp.179-184，2003.

6) 朱 木蘭，藤田睦博，橋本識秀，工藤睦信：ファジィ推論手法によるリードタイムの長い流出予測，水文・水資源学会誌，Vol.7,No.2，pp.83-89，1994.

7) 近森秀高，永井明博：局所線形近似法を用いた洪水実時間予測，水文・水資源学会誌，Vol.15,No.2，pp.164-175，2002.

8) 藤原洋一，田中丸治哉，畑 武志，多田明夫：Nearest-Neighbor 法による実時間流出予測の実用的適用法に関する研究，水文・水資源学会誌，Vol.16,No.1，pp.33-44，2003.

9) Smith, P.J.，関井勝善，小尻利治：遺伝的プログラミングと自己組織マップによる流出流量モデルの誤差処理，水文・水資源学会 2004 年研究発表会要旨集，pp.168-169，2004.

10) 高崎忠勝，土屋十圀，増田信也：遺伝的アルゴリズムを用いた都市中小河川の水位予測，水工学論文集，第 49 巻，pp.451-456，2005.

11) 土木学会：水理公式集例題プログラム集平成 13 年版，2002.

12) 永井明博，田中丸治哉，角屋 睦：ダム管理の水文学 －河川流域の洪水予測を中心として－，2003.

13) 北海道河川防災研究センター：「実時間洪水予測システム理論」解説書，2004.

14) 角屋　睦，永井明博：ダム貯水池の流水管理に関するアンケート調査の概要，ダム工学，No.22，pp.50-56，1996.

15) 河川情報センター：中小河川における洪水予測の手引き，2002.

16) 藤田 暁，大東秀光，上坂 薫，椎葉充晴，立川康人，市川 温：分布型流出モデルに基づくダム流入量実時間予測モデルについて，水工学論文集，第 45 巻，pp.115-120，2001.

17) 高棹琢馬，椎葉充晴，市川 温：分布型流出モデルのスケールアップ，水工学論文集，第 38 巻，pp.809-812，1994.

18) KIM, S., TACHIKAWA, Y., and TAKARA, K.: REAL-TIME PREDICTION ALGO- RITHM WITH A DISTRIBUTED HYDROLOGICAL MODEL USING KALMAN FILTER，水工学論文集，第 49 巻，pp.163-168, 2005.

19) 市川 温，小椋俊博，立川康人，椎葉充晴，宝 馨：山腹斜面流出系における一般的な流量流積関係式の集中化，水工学論文集，第 44 巻，pp.145-150，2000.

20) 建設省河川局監修、日本河川協会編：改訂新版建設省河川砂防技術基準（案）同解説 調査編，1997.

21) 朴 珍赫，小尻利治，友杉邦雄：流域環境評価のための GIS ベース分布型流出モデルの展開，水文・水資源学会誌，Vol.16,No.5，pp.541-555，2003.

22) 賈 仰文，倪 广恒，河原能久，末次忠司：都市河川流域の水循環解析と雨水浸透施設の効果の評価，水工学論文集，第 44 巻，pp.151-156，2000.

23) 池淵周一，椎葉充晴，宝 馨，立川康人：エース水文学，2006.

24) 椎葉充晴：流出系のモデル化と予測に関する基礎的研究，京都大学博士論文，1983.

25) 椎葉充晴，市川 温，榊原哲由，立川康人：河川流域地形の新しい数理表現形式，土木学会論文集，No.621／II-47，pp.1-9，1999.

26) 市川 温，村上将道，立川康人，椎葉充晴：流域地形の新たな数理表現形式に基づく流域流出系シミュレーションシステムの開発，土木学会論文集，No.691／II-57，pp.43-52，2001.

27) 土木学会：水理公式集［平成 11 年版］，pp.52-55，1999.

28) 水文・水資源学会編集：水文・水資源ハンドブック，pp.50-54，1997.

第５章　降雨～流出予測手法の統合・実運用に関する研究

５．１　概説

第３章で述べた降雨予測手法、および第４章で述べた流出予測手法を用いて、ダム流入量を実時間で予測するシステムを構築した。このシステムは、黒部川流域を対象として、10 分毎に実際の気象データ、水文データを受信し、6 時間先までの降水量および流入量の予測を行うものである。

本章では、第２節において、黒部川水系における電力ダムの管理を統括する関西電力の新愛本制御所に構築した降雨・流出予測システムの概要について述べる。つぎに、第３節において、出し平ダムのダム排砂時を例として予測システムの実運用結果について説明するとともに、精度検証の結果について述べる。

図-5.1.1　ダム管理の現場における降雨・流出予測システムの使用状況

（操作員左方のノートパソコンに表示中）

５．２　山岳域における降雨予測手法と流出予測手法の統合

５．２．１　ダム流入量予測システムの構築

（１）　システム構成

構築した降雨・流出予測システムの構成図を、図-5.2.1 に示す。

システムを構成する機器（マイコスサーバ、降雨予測 PC、流出予測 PC、Web サーバ、放流量取水量設定 PC）は、関西電力の新愛本制御所に設置した。新愛本制御所では、流入量予測の対象ダムである出し平ダム、小屋平ダム、仙人谷ダムと、その上流の黒部ダムの管理を統括している。仙人谷ダムと出し平ダムからは、専用のデータ通信線を設けることにより、降雨予測・流出予測に必要な、４ダムの各種データ（表-5.2.1 および表-5.2.2 を参照）を受信している。システムのハード構成を図-5.2.2 に示す。

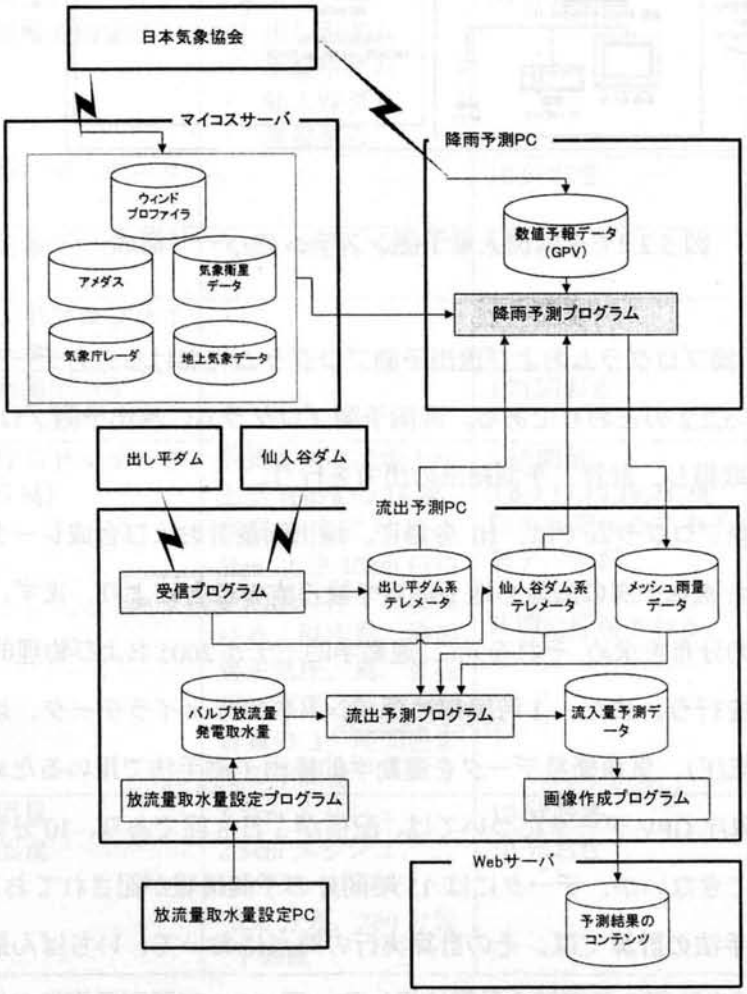


図-5.2.1　システム構成図

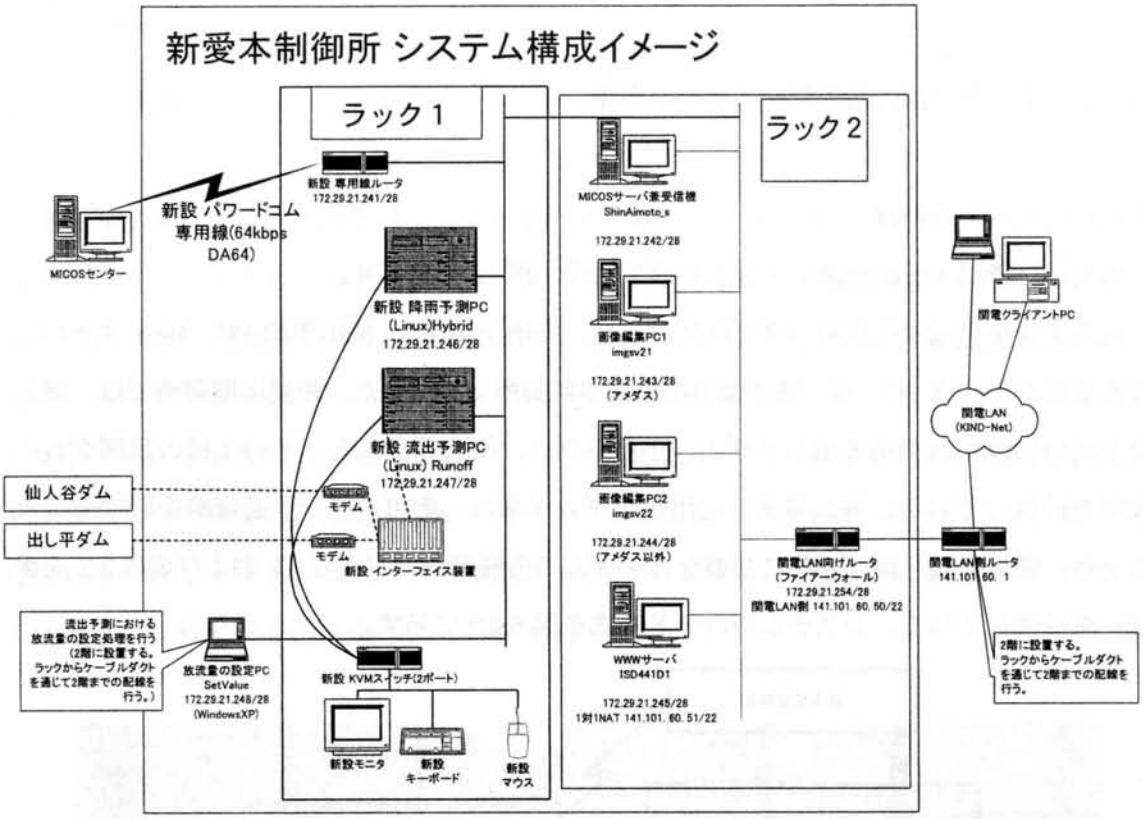


図-5.2.2　ダム流入量予測システムのハード構成

図-5.2.1 の降雨予測プログラムおよび流出予測プログラムにおける入力データ、出力データは、表-5.2.1、表-5.2.2 のとおりである。降雨予測プログラム、流出予測プログラムとも、10 分毎にデータを取得し、計算、予測結果の出力を行う。

このうち降雨予測プログラムでは、10 分毎に、地上雨量計および合成レーダの最新のデータを受信する。合成レーダの雨量を地上雨量で補正することにより、まず、その時刻における雨量の空間的分布を求め、それを元に、運動学的モデル 2005 および物理的モデル 2005 で降雨予測の計算を行う。また、１時間毎にウィンドプロファイラデータ、地上気象データ（気温、湿度、気圧）、気象衛星データを運動学的降雨予測手法で用いるために編集処理する。さらに、気象庁 GPV データについては、配信が１日８回であり、10 分毎に最新のデータを得ることはできないが、データには 15 時間分の予測情報が記されており、１時間毎に実行する物理的手法の計算では、その計算実行の時点において、いちばん最後に受信した GPV データの該当時刻の予測値を計算に用いる。図-5.2.3 に降雨予測における計算頻度の模式図を示す。

流出予測プログラムでは、10 分毎に、降雨予測プログラムで算出した実況雨量と予測雨量、および、各ダムの実測流入量、ゲート放流量、発電取放水量のデータを受け取って、ダム流入量予測の計算を行う。

ただしここで、ダムの流入量は、貯水位変化と放流量を基に貯水池の水収支の計算で求められたものである。したがって、ダムにおいて 10 分間の貯水位変化に基づき流入量を算出している場合、その算出された流入量は、過去 10 分間の平均的な流入量である。このため、流出予測プログラムでは、受信した流入量のデータは、5 分の遅れのあるデータとして扱うものとした。

表-5.2.1　降雨予測プログラムにおける入力データ、出力データ

	データ種別	内　容	取得・出力時間間隔	備　考
入力データ	地上雨量計データ（アメダス）		10 分おき	日本気象協会から電話回線を通じて受信
	地上雨量計データ（関西電力雨量計）	4 地点 ・　出し平ダム ・　小屋平ダム ・　仙人谷ダム ・　黒部ダム	10 分おき	出し平ダム・仙人谷ダム操作卓から受信
	合成レーダーデータ		10 分おき	日本気象協会から電話回線を通じて受信
	地上気象データ	気温、湿度、気圧	1 時間おき	日本気象協会から電話回線を通じて受信
	ウィンドプロファイラデータ		1 時間おき	日本気象協会から電話回線を通じて受信
	気象衛星データ		1 時間おき	日本気象協会から電話回線を通じて受信
	気象庁ＧＰＶデータ（ＭＳＭ）	鉛直方向には地上～上空 10hPa の 16 層、水平方向には地上 5km、上空 10km の格子間隔の格子点における、降水量、海面更正気圧、風、気温相対湿度、数値予報雲量の 15 時間後までの予測値	3 時間毎 3,6,9,12,15,18,21,24 時を初期値とする予測データが、6,9,12,15,18,21,24,3 時頃に配信される。	日本気象協会から電話回線を通じて受信
出力データ	実況雨量	2.5km メッシュ	10 分おき	
	予測雨量	2.5km メッシュ、10 分先、20 分先、…、350 分先、360 分先予測値	10 分おき	

表-5.2.2　流出予測プログラムにおける入力データ、出力データ

	データ種別	内　容	取得・出力時間間隔	備　考
入力データ	実況雨量	2.5km メッシュ	10 分おき	降雨予測プログラムによる
	予測雨量	2.5km メッシュ 6 時間先まで 10 分ごとの予測値	10 分おき	降雨予測プログラムによる
	実測流入量	・　仙人谷ダム ・　小屋平ダム ・　出し平ダム	10 分おき	出し平ダム・仙人谷ダム操作卓から受信
	現在時刻までの上流ダム放流量、発電使用水量の実績値	・　黒部ダム ・　仙人谷ダム ・　小屋平ダム	10 分おき	出し平ダム・仙人谷ダム操作卓から受信
	現在時刻以降の上流ダム放流量、発電使用水量の予定値	・　黒部ダム	30 分毎	操作員がキーボード入力した予定値を用いる（図-5.2.7 参照）
出力データ	予測流入量	・　仙人谷ダム ・　小屋平ダム ・　出し平ダム 6 時間先まで 10 分ごとの予測値	10 分おき	

運動学的モデル

・10 分に 1 回、6 時間先まで予測計算を行う。

物理的モデル

・1 時間に 1 回、7 時間先まで予測計算を行う。

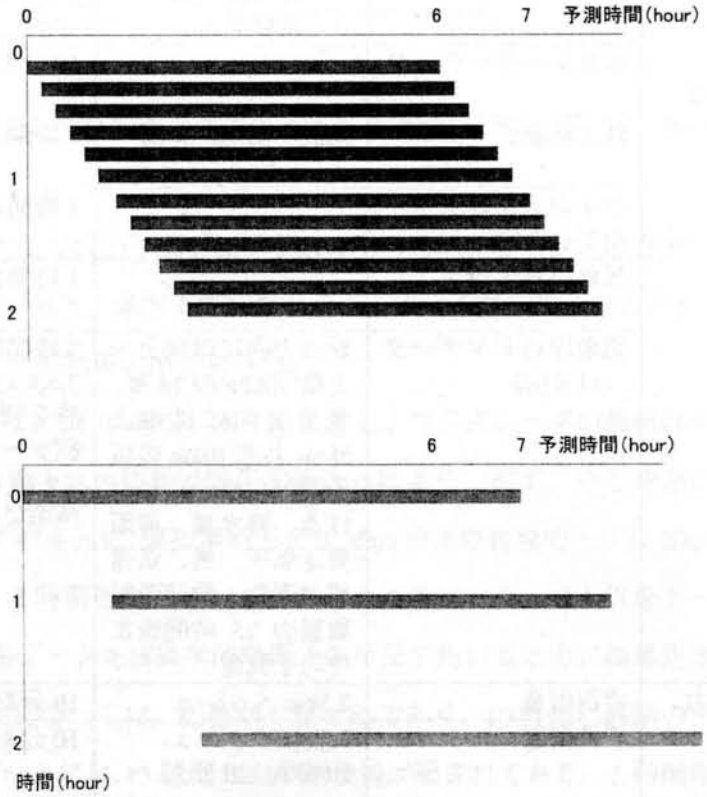


図-5.2.3　降雨予測手法における計算頻度の模式図

上記を考慮した流入量予測計算の流れを、図-5.2.4 に示す。図の①～⑤の状況は、下記のとおりである。

① 現在時刻までの観測雨量と現在時刻以降の予測雨量に基づき、予測流量を計算する。

② 時刻が 10 分進み新しい観測雨量が入手されたら、その観測雨量を用いて、5 分ぶんの時間更新を行う。時間更新の式は一般的に式(4.3.29)、式(4.3.30)で示される。時間更新された状態ベクトル x に基づき、式(4.3.28)により流量 y を計算する。

③ 観測雨量と同時に、新しい観測流量（図中☆印）が得られるため、それに基づく観測更新を行う。ただし観測流量データは 5 分前の値として扱う。観測更新の式は、一般的に式(4.3.31)～式(4.3.33)で示される。

④ 観測雨量に基づく時間更新を、残りの 5 分間分行う。

⑤ 現在時刻以降の時間更新を、予測雨量を用いて行う。

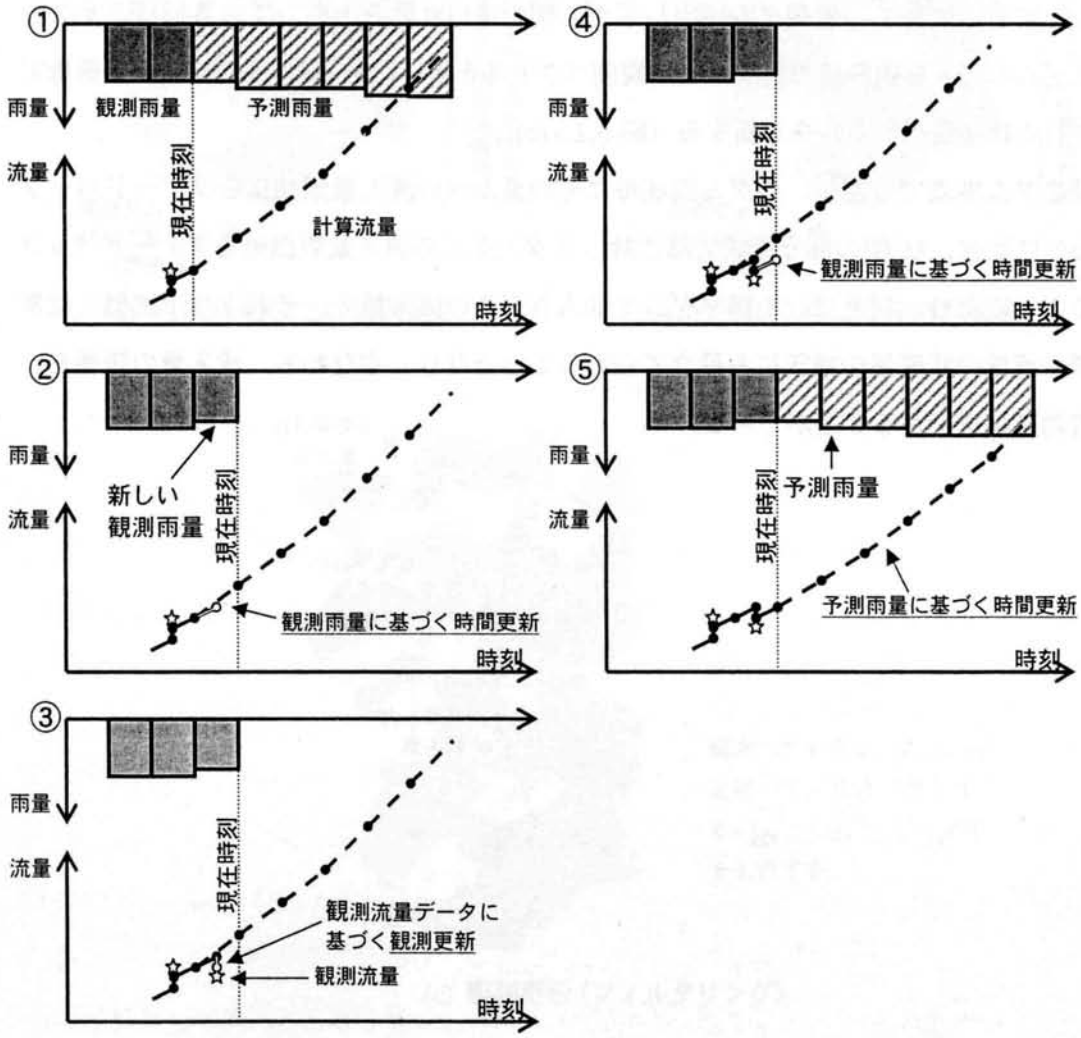
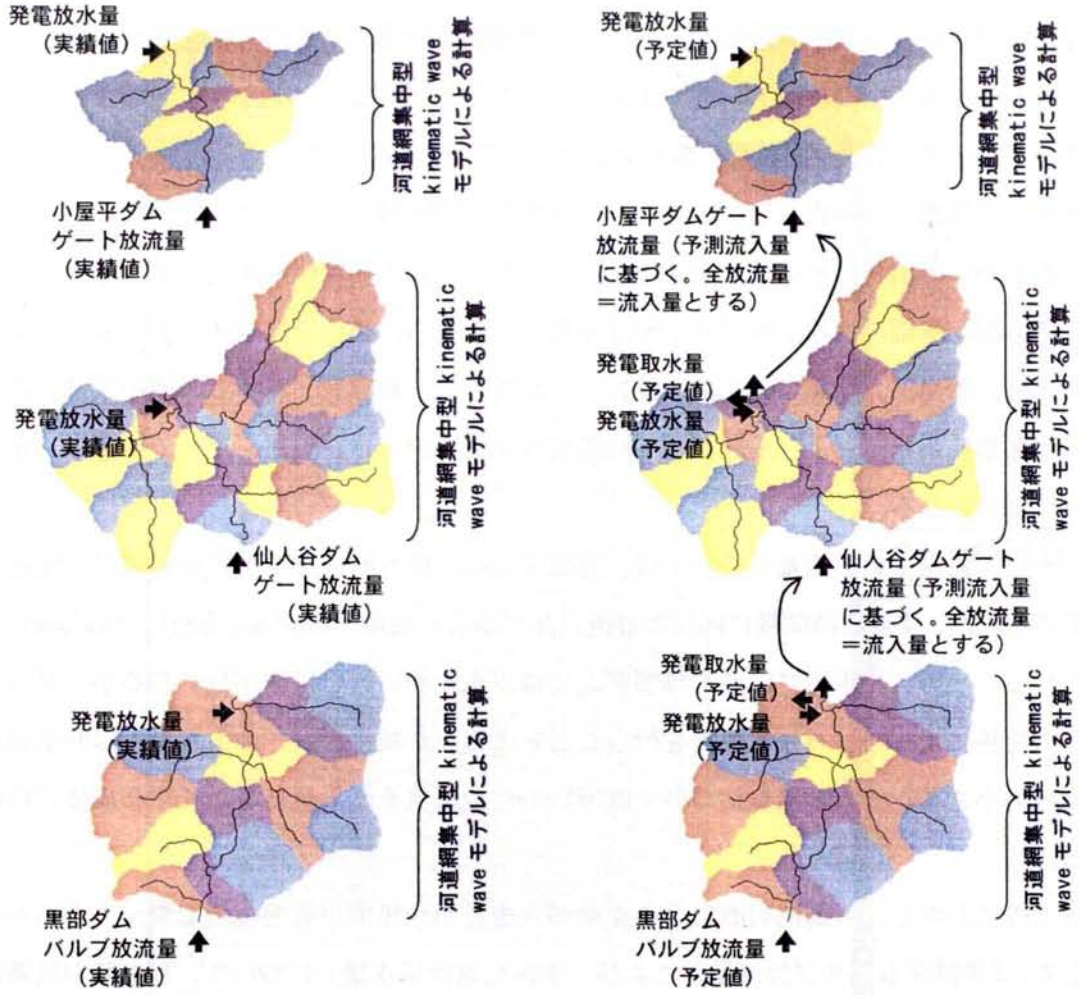


図-5.2.4　流入量予測計算の流れ

各ダムから受け取る流量データのうち、実測流入量は、図-5.2.4 に示したように観測更新に用いる。一方、ゲート放流量、発電取放水量については、流出計算に直接取り込む。すなわち、実測雨量を用いた現在時刻までの時間更新では、河道網集中型 kinematic wave モデルによる河道の流れの計算において、ダム地点から下流側の部分流域に受け渡す流量を、ダムにおける実績のゲート放流量に置き換える。また、河道へ放流される実績の発電使用水量を加味して、ダム流入量を算出する（図-5.2.5 (a)）。また、現在時刻以降の時間更新では、各ダムで流入量＝放流量のゲート操作が行われるものと仮定し、計算によるダム流入量の予測値、および別途設定する発電使用水量と黒部ダムバルブ放流量の予定値に基づき、下流へ受け渡す流量を決定する（図-5.2.5 (b)）。

実測雨量を用いた、現在時刻までの時間更新では、ダム地点で下流への流量を実績のゲート放流量に置き換えるため、流出計算はダム地点で分断される形になる。しかし、その時間更新の途中で行う観測更新の際には、分断された各ダム流域ごとの流出計算が行われているとするのでなく、黒部ダム～出し平ダム間の流出計算を一括して取り扱う。すなわち、３ダムの流入量観測値で構成される観測ベクトルを用い、45 個の部分流域の状態量で構成される状態量ベクトルを更新する（図-5.2.5 (c)）。

流域をダム地点で分割し、各ダム流域毎にそのダムへの流入量観測値をフィードバックさせるのに比べ、45 個の部分流域全部に対し 3 ダム全ての流入量観測値をフィードバックさせることにより、例えば、小屋平ダムや仙人谷ダムの流入量を、それより下流側に位置する部分流域の状態量の補正にも役立てられることとなり、すなわち、流入量の情報を、より有効に利用できることができる。



(a) 現在時刻までの時間更新　　(b) 現在時刻以降の時間更新

観測ベクトル $\mathbf{z} = [z_1, z_2, z_3]^T$
を用いて、状態ベクトル
$\mathbf{X} = [q_0{}^1, \cdots, q_0{}^{45}, p^1, \cdots, p^{45}]^T$
を更新する。

(c) 観測更新（フィルタリング）

図-5.2.5　時間更新、観測更新におけるゲート放流量、発電取水量の扱い

現在時刻以降の予測計算には、上流のダム放流量や発電使用水量の現在時刻以降の値を入力値として用意する必要がある。対象となるダム、発電所は、図-4.4.1 に示したとおりであり、これらダムおよび発電所の運用の実態は以下のとおりである。

まず、各発電所の発電量については、関西電力供給区域の電力需要予測等に基づき、通常、あらかじめ前日に発電予定が定められ、それに応じて発電使用水量が定まることとなる。その際、黒部川水系全体で効率的な発電となるよう、最上流発電所である黒四で発電後の水は、新黒三、新黒二の系統で優先的に使用され、新黒三、新黒二の使用水量を超える黒四発電使用水量および黒部ダム下流残留域からの流入量を黒三、黒二で使用し、発電を行うこととなる。

つぎに、各ダムの放流量については、黒部ダムは、低水時は黒部峡谷の景観等に配慮して定められた、季節と時間帯に応じた放流バルブからの放流（15m^3/sec または 10m^3/sec）が行われる。一方、出水時には通常黒部ダムでは洪水を溜め込む操作が行われるが、ダム水位等の条件によってはバルブ放流を行うこともある。小屋平ダム、仙人谷ダムは貯水容量が比較的小さく、ダム放流量については原則的に放流量を流入量に等しくする操作が行われる。

以上のことから、人為的判断による変動が大きくかつ黒部川流況への影響が大きいものとして、「黒部ダムバルブ放流量」および「黒四発電使用水量」について、現在時刻以降の数字を別途オペレータによりキーボードから入力する装置をシステムに付設し、都度入力できるようにした。その入力用の画面を図-5.2.6 に示す。また、その他のダム放流量および発電使用水量は以下のように設定した。

仙人谷ダムおよび小屋平ダムの放流量は、各ダムの流入量の予測値から発電使用水量の予定値を差し引いた値を、現在時刻以降のそれぞれのダムの放流量とした。

新黒三、黒三、新黒二、黒二の各発電使用水量については、黒四の発電使用水量に従属して値が決定されるよう、つぎのように規定した。

新黒三：　黒四発電取水量予定値に等しくする。ただし黒四発電取水量予定値が 46m^3/sec より大きいときは 46m^3/sec とする。

黒三　：　黒四発電取水量予定値から新黒三発電取水量を差し引いた値とする。

新黒二：　黒四発電取水量予定値に等しくする。ただし黒四発電取水量予定値が 46m^3/sec より大きいときは 46m^3/sec とする。

黒二　：　黒四発電取水量予定値から新黒二発電取水量を差し引いた値とする。

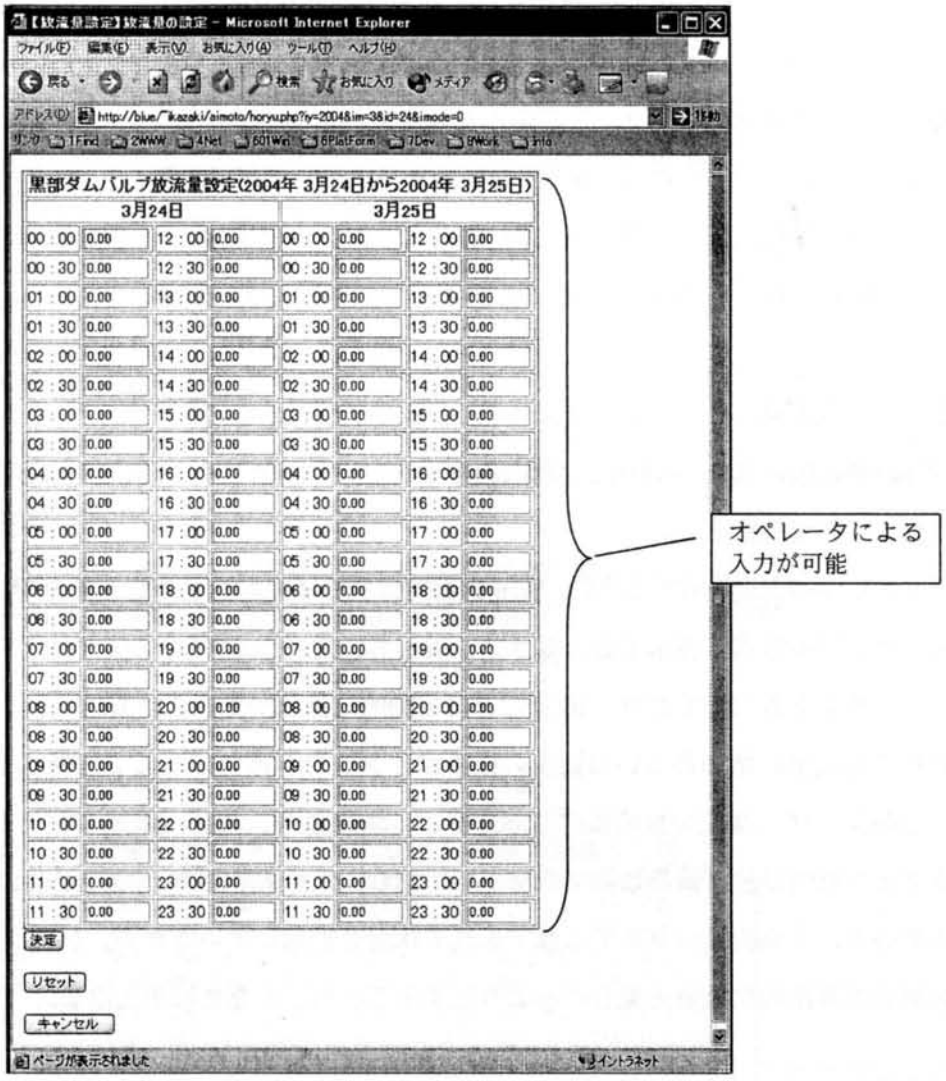


図-5.2.6　放流量設定画面（発電使用水量設定画面も同様の画面）

なお、降雨予測プログラム・流出予測プログラムは、出水時、低水時の区別をせず、常時稼働している。このため、黒部ダムバルブ放流量および黒四発電使用水量の予定値は、常に流出予測計算に必要となるものである。しかし、黒部川流域においては、低水時の流入量予測の必要性は低く、低水時も含めて毎日、黒部ダムバルブ放流量および黒四発電使用水量の予定値をキーボードから入力することはオペレータにとって負担となる。このため、キーボードから値の入力が無い場合、黒部ダムバルブ放流量については季節・時刻ごとに定められた所定の放流量の値を用い、また、黒四発電使用水量については現在時刻の発電使用水量の値が継続されるものとした。

この黒部ダムバルブ放流量および黒四発電使用水量を設定するための PC は、図-5.2.2 に示したとおり、新愛本制御所に１台だけ設置した。１カ所でなく、出し平ダムを始めとす

る各ダム等、複数箇所からこれら放流量・発電使用水量を設定できるようにした方が良いという考え方もありうるが、本システムにおいては、出水時における情報の錯綜を防ぐ等の観点から、入力箇所は一元化するものとした。

なお、図-5.2.6 の黒部ダムバルブ放流量および黒四発電使用水量の入力画面では、当日 0 時～23 時 30 分および翌日 0 時～23 時 30 分の合計 48 時間分の入力欄を設けている。これは、どの時刻からでも 24 時間先までの値を入力できるように配慮したものである。

（２）　ダム運用ニーズに応じたユーザーインターフェース

予測計算結果は Web 画面化し、社内のネットワークを通じて、MICOS の情報とともにブラウザにて閲覧可能とした。

図-5.2.7、図-5.2.8 に示すように、Web 画面では、流域平均雨量と流入量の予測値を、グラフ形式および表形式で表示する。グラフ、表とも、過去 24 時間分の実測値と将来 6 時間先までの予測値を表示しており、10 分ごとに自動的に画面が更新される。

雨量や流入量の増加あるいは減少の様子は、グラフがあれば一目で把握することができる。しかし、ダム操作の放流操作においては、洪水量や、放流の増加のさせ方の制限等、さまざまな規則が放流量の数値で規定されており、ダム操作員は、「○○m^3/sec」といった、流入量あるいは放流量の具体的な数字を見て状況を把握しているため、グラフだけでなく、表の形式で具体的な数値を見られるようにすることも、非常に有用となる。

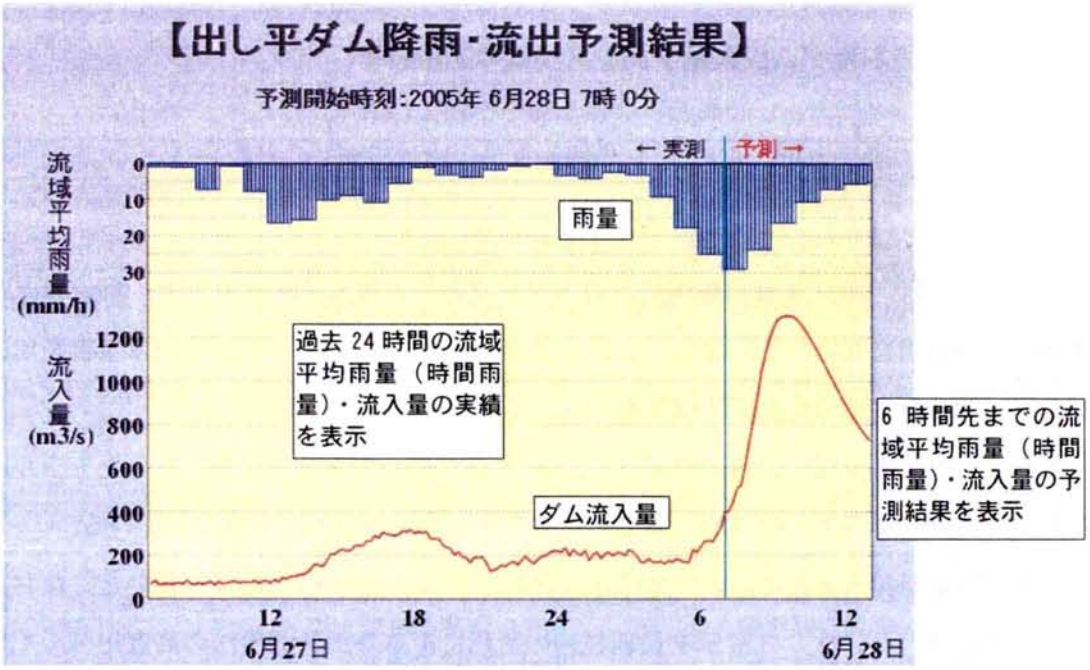


図-5.2.7　流入量予測結果画面表示例（グラフ）

ダム流入量数値データ

出し平ダム【流入量 (m3/s)】

月日時 | 分	00	10	20	30	40	50
06/27 07	68.1	81.2	65.6	65.6	70.8	65.6
06/27 08	68.0	73.4	65.7	83.9	70.8	63.0
06/27 09	73.4	65.7	70.9	79.4	61.7	78.4
06/27 10	68.9	72.6	76.5	80.4	73.2	75.9
06/27 11	76.3	74.2	82.0	71.6	79.6	82.0
06/27 12	71.7	87.3	76.9	96.6	90.0	102.1
06/27 13	102.5	109.7	110.9	118.4	136.3	159.6
06/27 14	155.1	147.1	174.7	204.6	205.8	219.6
06/27 15	227.9	219.1	223.3	242.5	246.8	242.3
06/27 16	267.6	264.6	291.2	278.8	305.5	298.4
06/27 17	294.2	289.2	296.9	312.9	307.9	319.8
06/27 18	300.7	310.6	303.0	308.2	275.2	275.5
06/27 19	278.4	247.4	237.0	230.5	201.4	217.3
06/27 20	193.8	188.1	166.4	191.9	188.2	191.2
06/27 21	168.0	127.4	131.1	142.0	155.2	148.2
06/27 22	164.3	172.4	155.2	177.1	196.5	175.0
06/27 23	160.8	180.4	194.5	199.0	212.1	220.9
06/28 00	220.1	213.8	235.8	196.0	225.6	208.1
06/28 01	198.9	223.5	174.2	204.1	215.3	183.7
06/28 02	206.6	214.0	195.4	212.1	212.7	196.5
06/28 03	225.8	216.5	197.1	169.6	166.7	185.3
06/28 04	169.2	166.4	174.3	159.7	176.5	169.0
06/28 05	185.1	175.1	169.1	165.4	226.4	213.8
06/28 06	241.8	265.1	266.8	262.6	298.3	325.2
06/28 07	395.5	403.4	447.0	504.9	524.2	608.4
06/28 08	724.3	818.3	925.2	1040.0	1126.0	1193.1
06/28 09	1245.6	1281.7	1296.4	1301.5	1301.5	1298.0
06/28 10	1281.2	1258.5	1231.9	1202.5	1170.9	1137.8
06/28 11	1103.5	1068.2	1032.4	996.2	960.5	925.6
06/28 12	892.2	860.7	830.9	802.6	776.2	751.2
06/28 13	727.8					

雨量数値データ

出し平ダム【流域平均雨量 (mm/h)】

月日時 | 分	00	10	20	30	40	50
06/27 07	0.0	1.1	1.6	3.4	0.0	0.0
06/27 08	0.0	0.1	2.1	3.6	0.4	0.1
06/27 09	4.6	9.7	6.6	6.2	9.0	7.6
06/27 10	5.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
06/27 11	0.0	0.0	8.2	10.8	12.4	14.7
06/27 12	14.5	14.7	16.0	17.0	18.1	18.6
06/27 13	15.9	16.5	15.8	15.0	14.6	15.8
06/27 14	14.4	9.8	10.3	9.0	9.0	7.7
06/27 15	8.4	9.6	9.2	9.5	9.1	7.8
06/27 16	10.2	9.0	10.4	12.6	11.2	11.0
06/27 17	9.4	6.4	7.6	5.2	3.2	0.7
06/27 18	0.6	0.3	3.8	1.6	0.2	0.3
06/27 19	0.3	3.4	3.1	3.1	4.6	5.1
06/27 20	5.9	2.3	4.7	2.2	3.8	4.0
06/27 21	0.4	1.1	2.0	1.3	4.2	2.6
06/27 22	0.2	0.3	1.8	0.2	1.7	0.0
06/27 23	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	1.0
06/28 00	2.5	0.7	0.5	0.1	6.9	9.6
06/28 01	11.4	8.1	3.9	0.4	0.3	0.3
06/28 02	0.6	0.3	5.1	3.5	3.3	1.7
06/28 03	0.6	1.3	2.1	2.3	7.0	6.4
06/28 04	9.9	6.1	7.5	8.2	8.3	14.7
06/28 05	16.4	17.9	17.6	16.1	14.9	23.7
06/28 06	21.4	18.6	20.1	34.9	26.5	28.3
06/28 07	31.4	30.4	29.5	28.6	27.7	26.9
06/28 08	26.0	25.1	24.9	23.7	22.2	20.7
06/28 09	19.2	17.9	16.9	15.8	14.7	13.6
06/28 10	12.8	11.8	11.0	10.1	9.4	8.6
06/28 11	7.9	7.5	7.2	6.9	6.6	6.3
06/28 12	6.0	5.8	5.6	5.4	5.3	5.2
06/28 13	5.1					

過去 24 時間の流域平均雨量（時間雨量）・流入量の実績を表示（10 分毎）

6 時間先までの流域平均雨量（時間雨量）・流入量の予測結果を表示（10 分毎）

図-5.2.8　流入量予測結果画面表示例（表）

５．３　統合されたダム流入量予測システムの運用結果

５．３．１　実運用への適用結果

本システムは、2004 年度に現地にプロトタイプとして導入・試運用の後、2005 年度から本格的に実運用を開始した。なお、この実運用と並行して、2004 年度の出水事例を用い、第３章、第４章に述べたモデル構築を実施している。

本節で述べる実運用への適用結果は、2005 年度の時点で実運用に供していたモデルによるものであり、本研究で最終的に構築したモデルとは、下記の点で異なっている。

まず、降雨予測モデルは、３．２に示したハイブリッドモデル 2004 を用いた。なお、この実運用と平行し、３．３に示す最新技術の活用による降雨予測手法の高度化（ハイブリッドモデル 2005）の開発を行った。

流出予測モデルについては、2005 年の実運用においては、2004 年に開発したモデル[1)]（流出予測モデル 2004 と称する）を用いており、第４章に述べたモデル（流出予測モデル 2005 と称する）と同様の構造をもつモデルであったが、第４章で述べたモデルとは表-5.3.1 に示したような差異を持つものであった。まず、有効降雨の算出に関して、流出率 f に関する設定、減衰率等が異なっている。さらに斜面の流出計算における諸係数が異なる。さらに 4 章で述べたモデルにおいては、損失降雨の累積および斜面の貯流量から蒸発量を差し引く操作を行っているが、流出予測モデル 2004 では斜面の貯流量からの蒸発は考慮していない。

この流出予測モデル 2004 は出水の急速な立ち上がりの再現性に重点を置いたモデルであり、この出水の立ち上がりに関しては流出予測モデル 2005 と同程度の再現性を持つモデルであった。しかしながら、ピーク後の逓減部の精度が劣る等の傾向が見られたため、改善を図ったものが流出予測モデル 2005 である。

すなわち、2005 年の実運用に用いたダム流入量予測システムは、降雨予測はハイブリッドモデル 2004、流出予測は、流出予測モデル 2004 により構成したものである。

表-5.3.1　流出予測モデルの差異

		流出予測モデル 2004[1)]	流出予測モデル 2005
流出予測モデル	有効降雨の算出	流出率 $f=(R_f/R_{f\,max})^2$ （ $R_{f\,max}$= 80 mm ） ・R_f は損失雨量の累積であり、1時間毎にα=0.990 を掛けて減衰させる。 ・減衰分のうち80%は基底流量として、河道への側方流入量に付加する。残りの 20%は蒸発して失われると考える。	流出率 $f=f_0+(1-f_0)\cdot(R_f/R_{f\,max})^2$ （ f_0 = 0.2, $R_{f\,max}$= 200 mm ） ・R_f は損失雨量の累積であり、1時間毎にα=0.992 を掛けて減衰させるとともに、斜面モデルの貯留量がゼロの時にはさらに 1時間毎に蒸発散量も差し引く。 ・減衰分は基底流量分として、河道への側方流入量に付加する。
	斜面の流出計算	・Manningの粗度係数n：1.0 ・表面流の定数m：1.667 ・表土層の透水係数k:0.005(m/sec) ・表土層空隙率γ：0.20 ・表土層厚D：0.20（m）	・Manningの粗度係数n：0.3 ・表面流の定数m：1.667 ・表土層の透水係数k:0.015(m/sec) ・表土層空隙率γ：0.25 ・表土層厚D：0.05（m） ・斜面モデルの貯留量からは1時間毎に蒸発散量を差し引く。
	河道の流れの計算	・Manningの粗度係数n：0.050 ・河川断面形状は、径深Rと通水断面積Aの関係を $R=K_1A^Z$,（K_1=0.15, Z=0.60）とする。 ・システムノイズ:a=1.0(mm/hour)（式(4.3.36)参照）, τ=18000(sec)（式(4.3.35) 参照）であり、部分流域どうしで式(4.3.38)に示す相関を持つ。 ・観測ノイズ：5.0^2（$(m^3/sec)^2$）	同左
	融雪の影響の考慮	季節に応じた基底流量（図-4.3.12）を、河道への側方流入量に付加する。	同左

黒部川における本システムの最大の利用目的は出し平ダム排砂時の体制確保である。本格運用を開始した 2005 年度のダム排砂および通砂時における、本システムの実運用結果について、以下に説明する。(排砂および通砂の定義は、１．３．５を参照)

2005 年 6 月 27 日の朝方より、梅雨前線の影響により雨が降り始め、13 時までに出し平ダム地点の累計降雨量が 30mm に達した。本システムによれば、さらに降雨が継続し、出し平ダムへの流入量も排砂実施基準流入量である 250m^3/sec を超えるものと予想された（図-5.3.1)。環境モニタリングを実施する地点で最も遠方であるのは出し平ダム上流部（猫又地点）であるが、この地点への唯一の交通手段である黒部峡谷鉄道の最終列車に間に合わせるために、13 時 30 分、外部の環境調査会社にモニタリング班の派遣を要請した。この後、

14 時 33 分に正式に排砂準備体制に入り、15 時 57 分に出し平ダムの排砂実施基準流入量を超える 281.7m^3/sec を観測し、排砂の実施を決定した。

以降の排砂時の経過を図-5.3.2 および以下に説明する。

同日 20 時 45 分から徐々に水位を低下させ、翌々日の 6 月 29 日 7 時 45 分に、自然流下状態となり、貯水池内の土砂を排出し始めた。その後順調に排砂を実施し、事前の計画に定められた自然流下開始時点から約 12 時間後の 19 時 45 分に自然流下を完了させた。

一方、停滞する梅雨前線の活動が再度活発化し、6 月 30 日の 4 時 37 分に出し平ダムの通砂実施基準流入量（480m^3/sec）を超える 484.4m^3/sec を観測し、通砂の実施を決定した。しかし、梅雨前線の活動が継続し上流域で雨が降り続けるものと予想され、通砂実施のために水位低下をしたとしても途中で中断を余儀なくされる恐れが多分にあった。このことから、同日 23 時 00 分、通砂実施を一時中断することを決定した。

この後、梅雨前線の活動が沈静化した 7 月 3 日の 17 時 00 分に一時中断が解除され、水位低下を開始した。12 時間弱の自然流下状態を計測した後、7 月 4 日の 12 時 10 分に水位回復を完了した。最終的には、7 月 5 日の 0 時 10 分に、出し平ダムにおける排砂（通砂）実施体制を解除した。

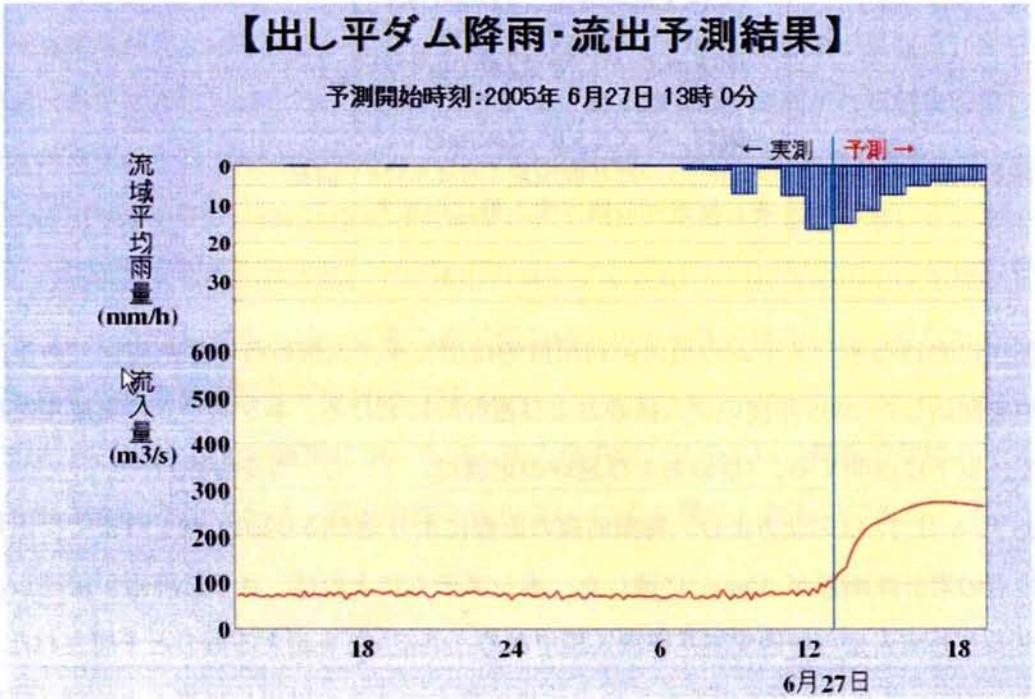


図-5.3.1　本システムによる予測状況

（2005 年 6 月 27 日 13 時 00 分時点）

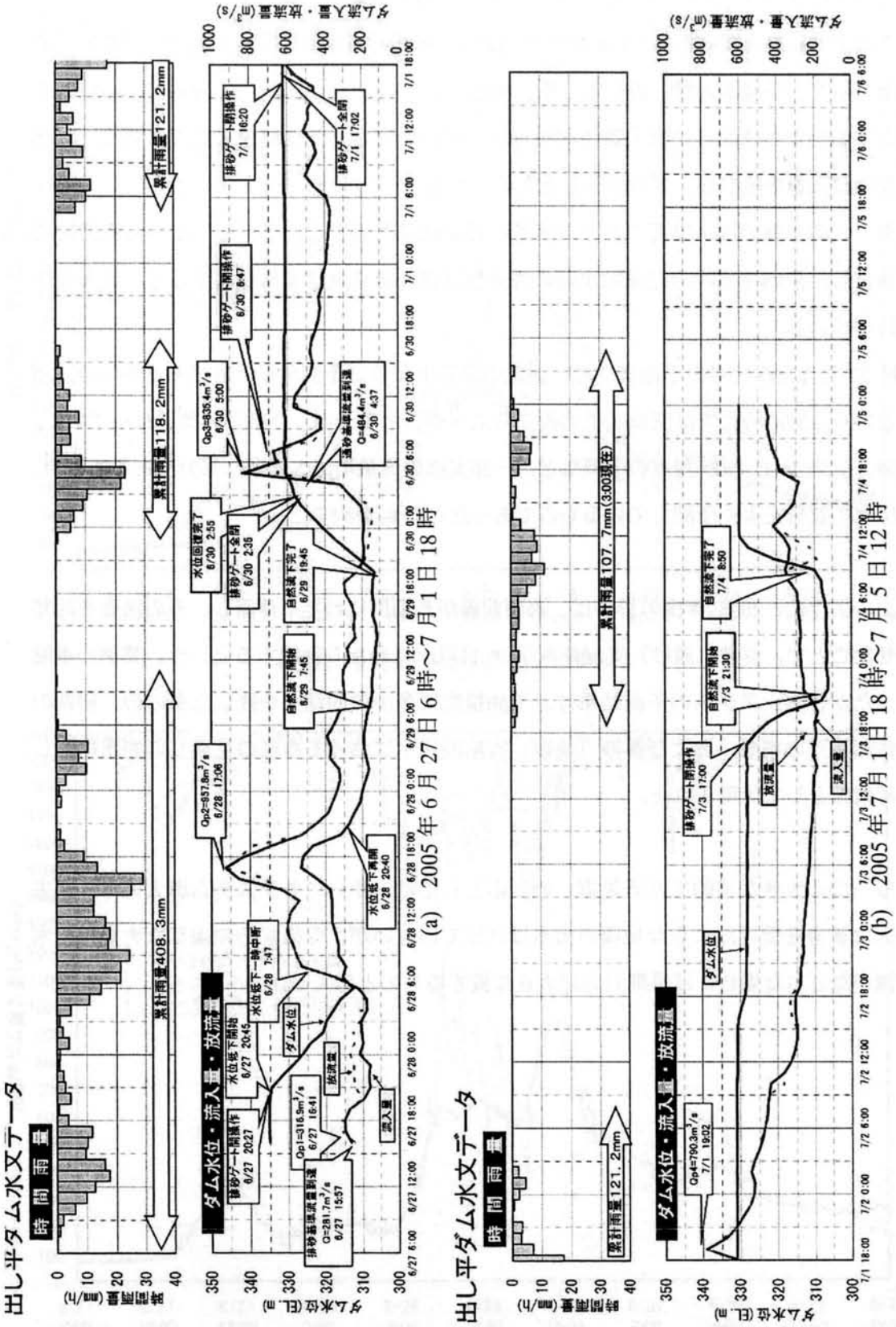


図-5.3.2　排砂・通砂実施状況

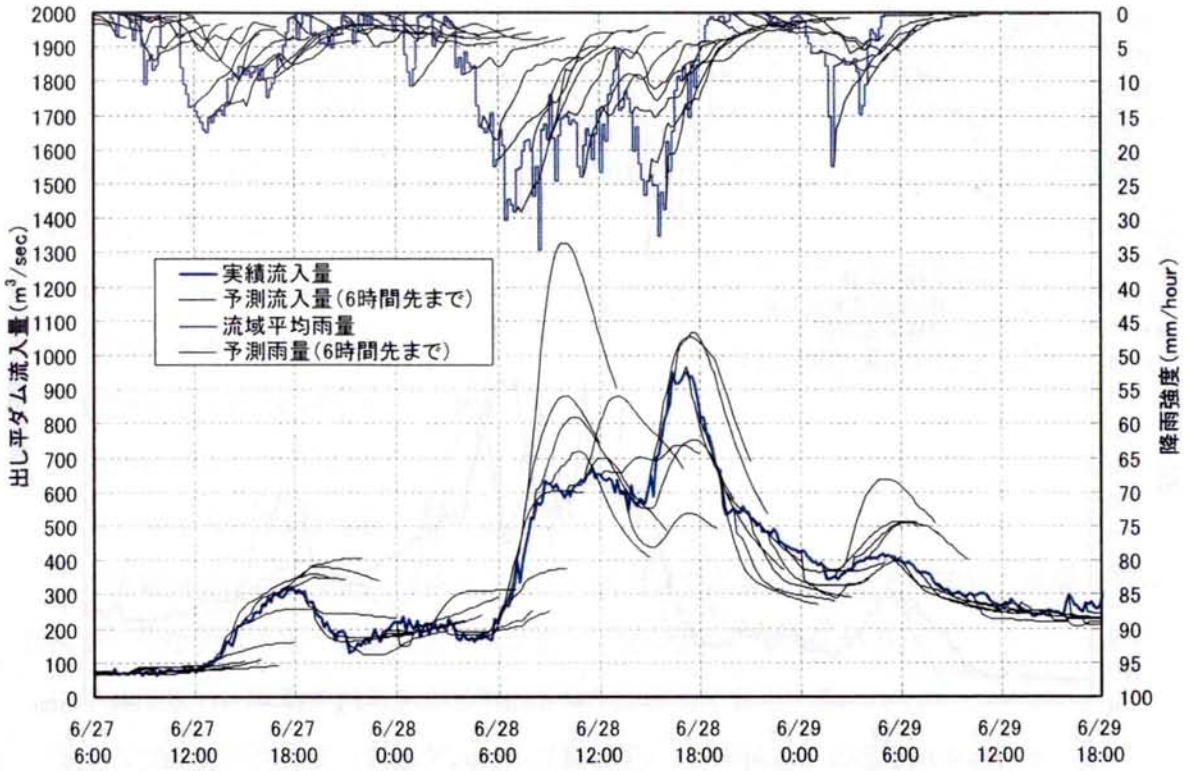
2005 年時点におけるダム流入量予測システムの精度検証の一例として、本出水前半における予測計算結果を図-5.3.3 に示す。グラフ(a)は、毎正時を起点に算出された、将来６時間分の出し平ダム予測流入量を表している。また、グラフ(b),(c),(d)は、10 分毎にその時刻を起点とする将来６時間分の流入量予測を行い、その算出された予測流入量のうち 2, 4, 6 時間先の流入量を抽出し、プロットしたものである。

なお、この計算では、黒部バルブ放流量の将来値は季節ごとに定められている維持放流量の値とし、黒四発電所の発電取水量の将来値は現在値を継続するものとして、流入量予測を行っている。

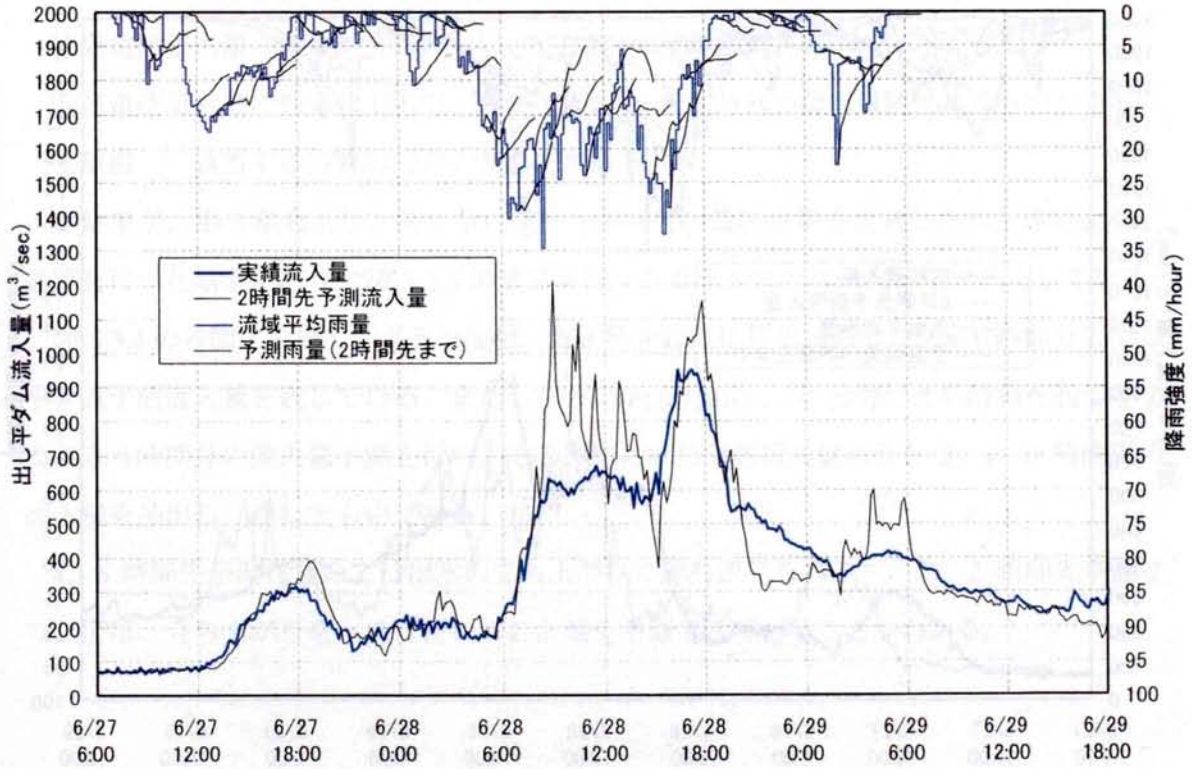
6 月 27 日 12:00 起点の予測までは、流量の立ち上がりの予測が不十分であるものの、前述のとおり、13:00 時点では流量がその後立ち上がることを予測した計算結果となっている。その後、6 月 28 日 7:00 起点の予測など、一部実際の流量に比べ過大な部分もあるものの、概ね出水の波形をよく予測しているものであったといえる。

以上のように、2005 年度の排砂は、梅雨前線が長期間にわたり停滞し、その活動を活発化させたことで、排砂（通砂）実施体制が 7 日以上にわたり継続するという、異例の事態となったが、本システムの予測結果は、予測精度に多少の問題点を残したものの、初期の実施体制入りの判断、および排砂（通砂）実施期間中における今後の見通しの判断に際して参考情報として活用された。

もう一つの大きな目的である災害への対応としては、幸いにもシステム導入後は、過去に多大な被害を受けたような規模の出水は生じていないが、今後、そのような大規模出水の予測がなされた場合には早期対応に大きく資するものと考える。

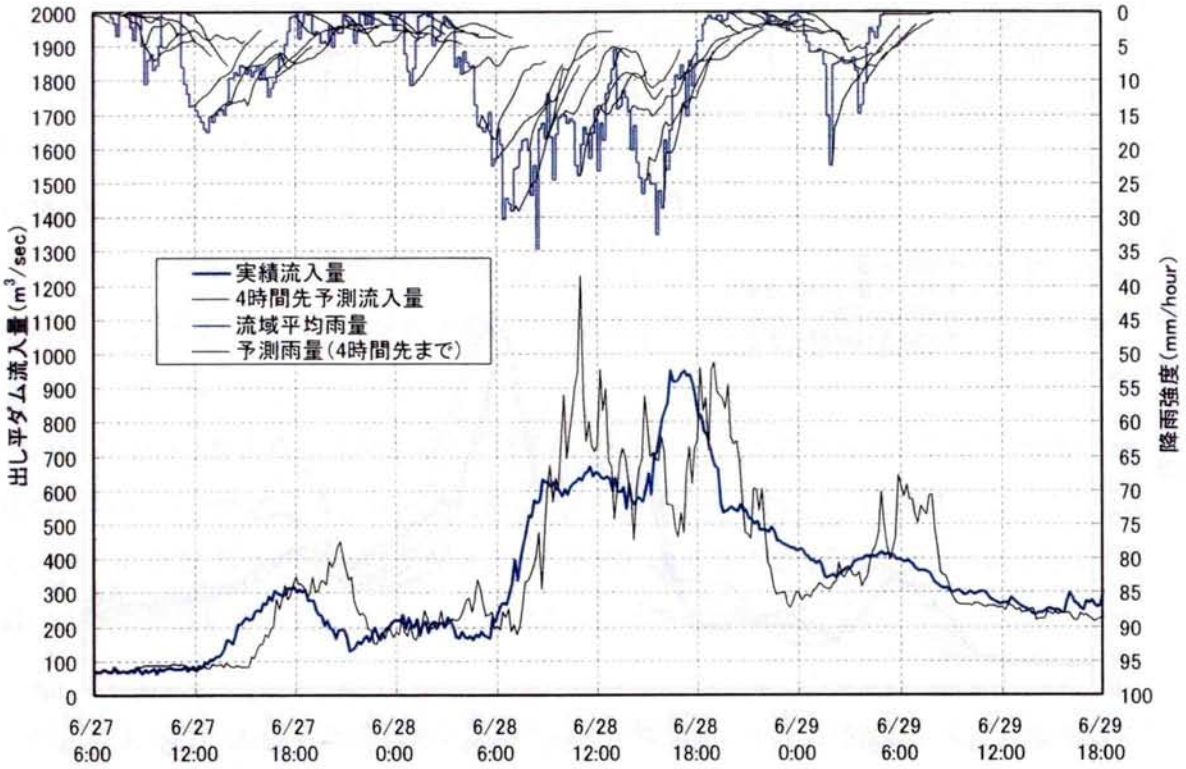


(a)　１時間毎の予測結果のグラフ

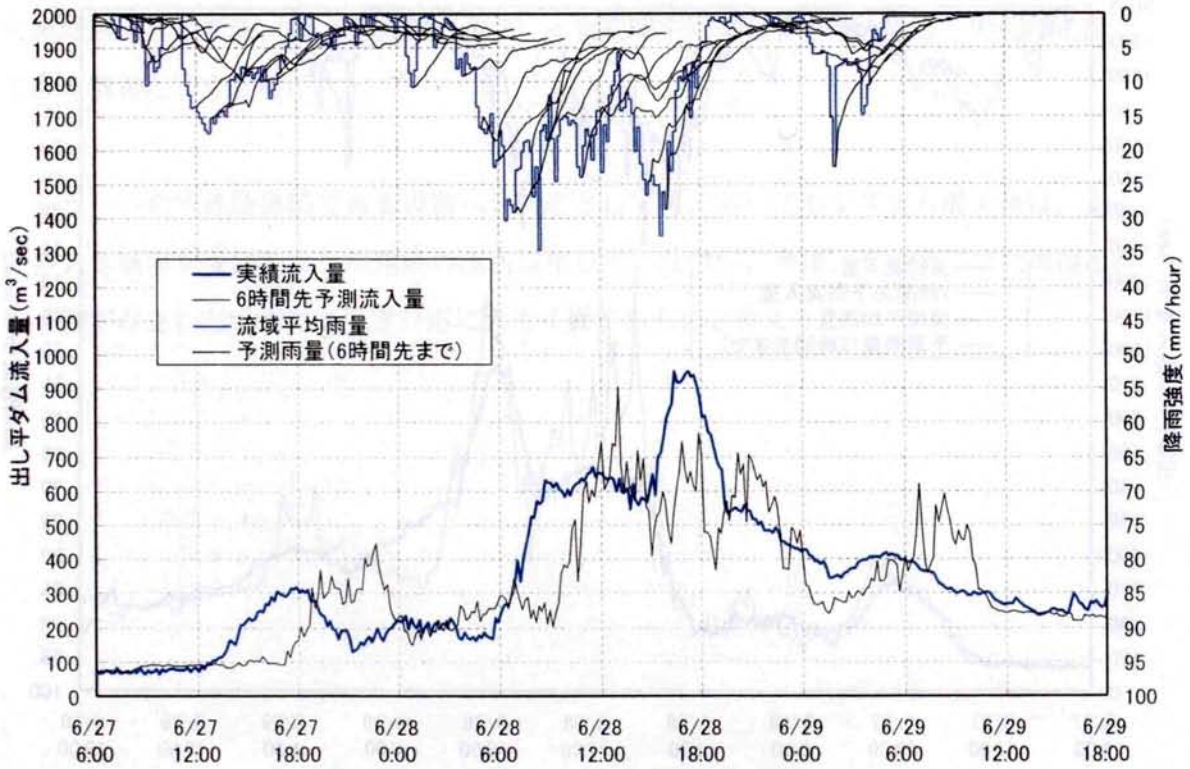


(b)　２時間先予測値のグラフ

図-5.3.3　流入量予測計算結果（2005 年 6 月 28 日出水）



(c)　４時間先予測値のグラフ



(d)　６時間先予測値のグラフ

図-5.3.3　流入量予測計算結果（2005 年 6 月 28 日出水）

５．３．２　ダム流入量予測システムの精度検証結果

第３章に示した降雨予測手法（ハイブリッドモデル 2005）、および、第４章に示した流出予測手法（流出予測モデル 2005）を用いて、流入量予測シミュレーションを行った結果を図-5.3.4 に示す。

対象とした出水は、図-4.4.6～図-4.4.9 に示した事例と同一である以下の 4 出水である。

①2004 年 5 月 17 日出水

②2004 年 7 月 18 日出水

③2004 年 8 月 31 日出水

④2005 年 6 月 28 日出水

この予測シミュレーションでは、入力データとして必要な、将来６時間分の雨量、ダム放流量、発電使用水量、気温の諸データを、下記のように与えている。

①予測雨量　：　降雨予測モデルで算出された予測雨量を用いる。

②ダム放流量の将来値（黒部ダムバルブ放流量）　：季節ごとの設定値を用いる。

③ダム放流量の将来値（仙人谷ダム・小屋平ダム）

：ダム放流量＝各ダム流入量の予測値－各ダムから取水する発電使用水量の将来値

④発電使用水量の将来値（黒四）　：現在時刻の値が継続されるものとする。

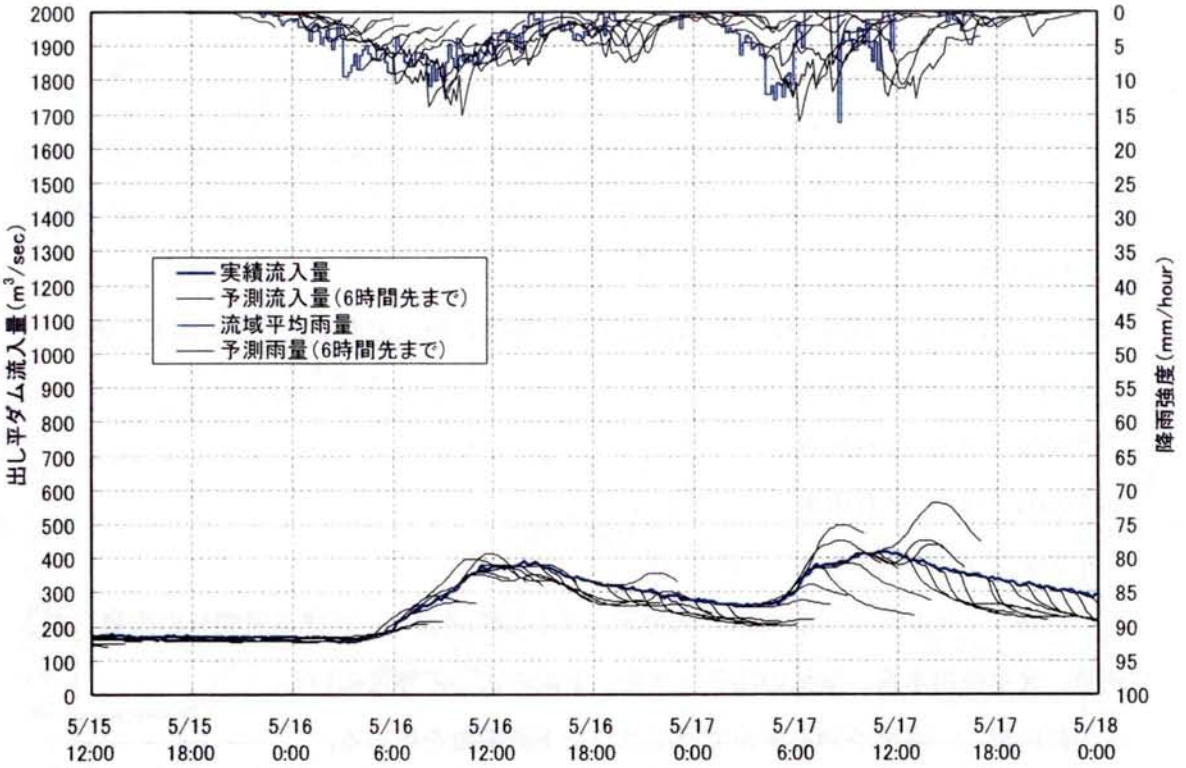
⑤発電使用水量の将来値（黒四以外の発電所）：現在時刻の値が継続されるものとする。

⑥気温　：　該当する時刻の前日の気温を用いる。

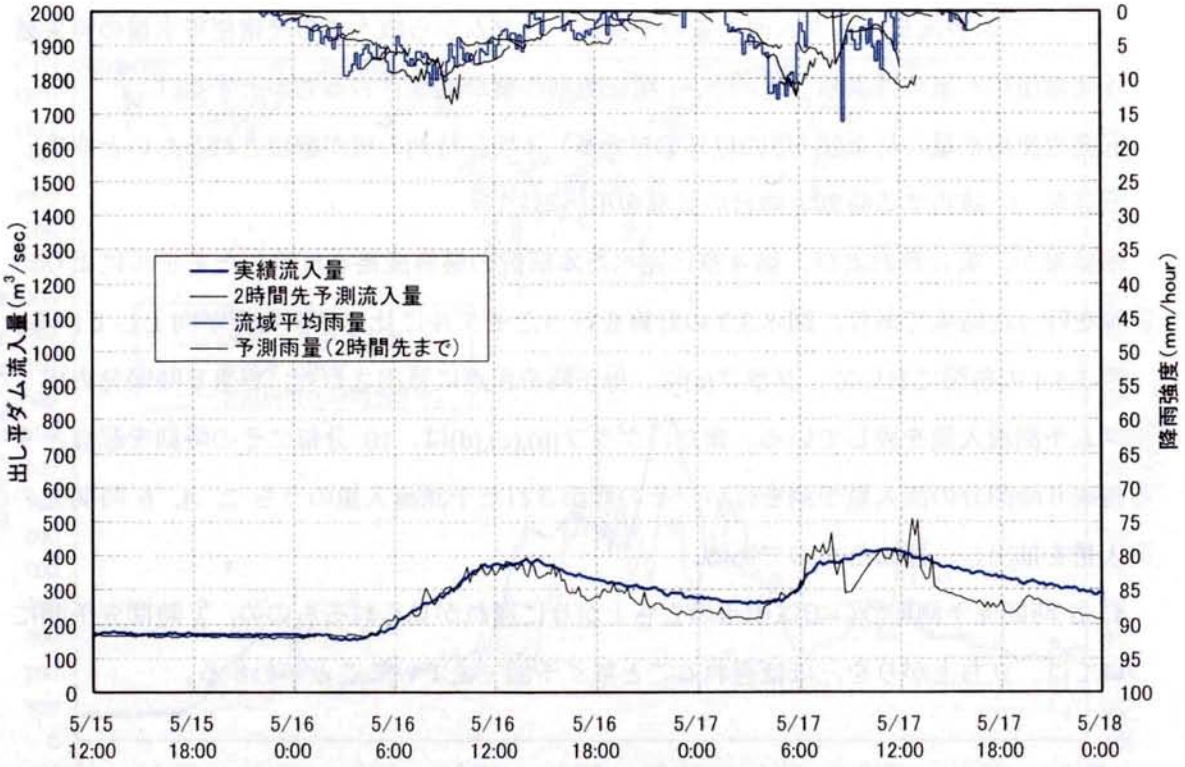
本結果が、第３章および、第４章に述べた本研究の最終成果を反映したモデルにより、計算を行った結果であり、図-5.3.3 の計算を行ったモデルに比べ予測精度が向上している。

図-5.3.4 の各図において、グラフ(a)は、毎正時を起点に算出された、将来６時間分の出し平ダム予測流入量を表している。また、グラフ(b),(c),(d)は、10 分毎にその時刻を起点とする将来６時間分の流入量予測を行い、その算出された予測流入量のうち 2，4，6 時間先の流入量を抽出し、連ねたものである。

4，6 時間先予測については出水の立ち上がりに遅れが見られるものの、2 時間先予測については、立ち上がりを、ほぼ遅れること無く予測できていることがわかる。



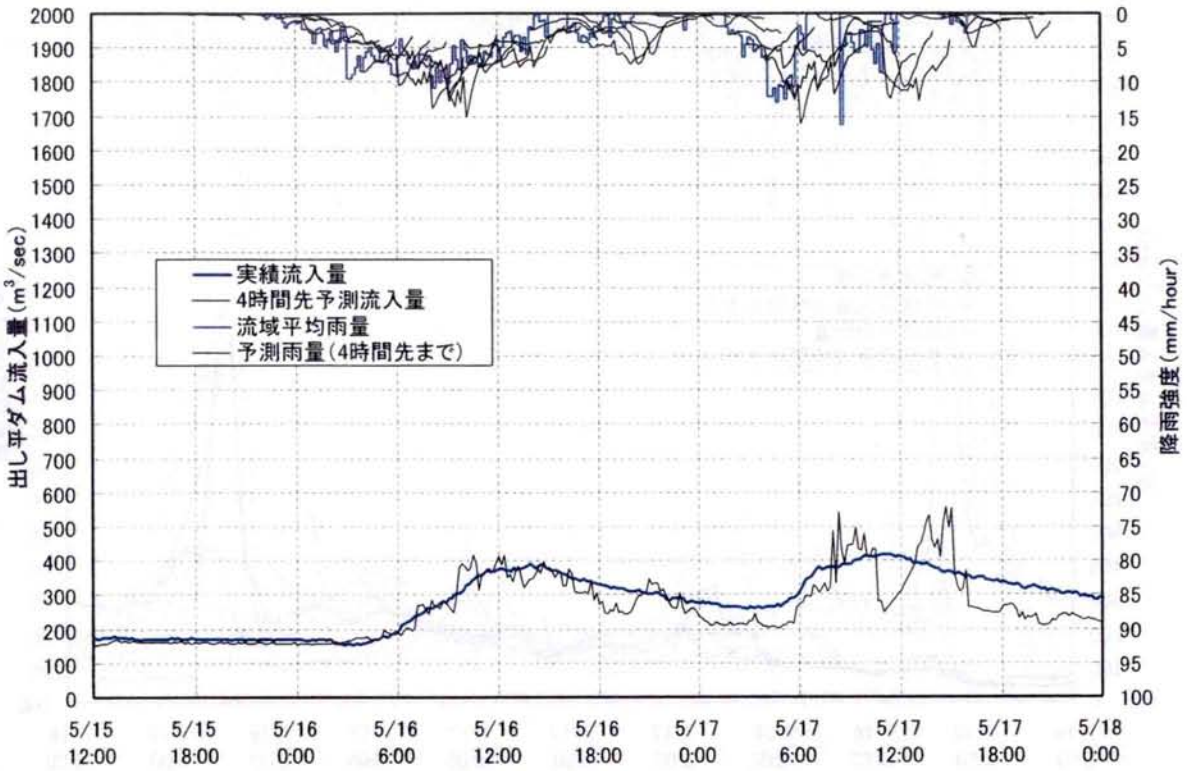
(a)　６時間先までの予測グラフ（毎正時起点）



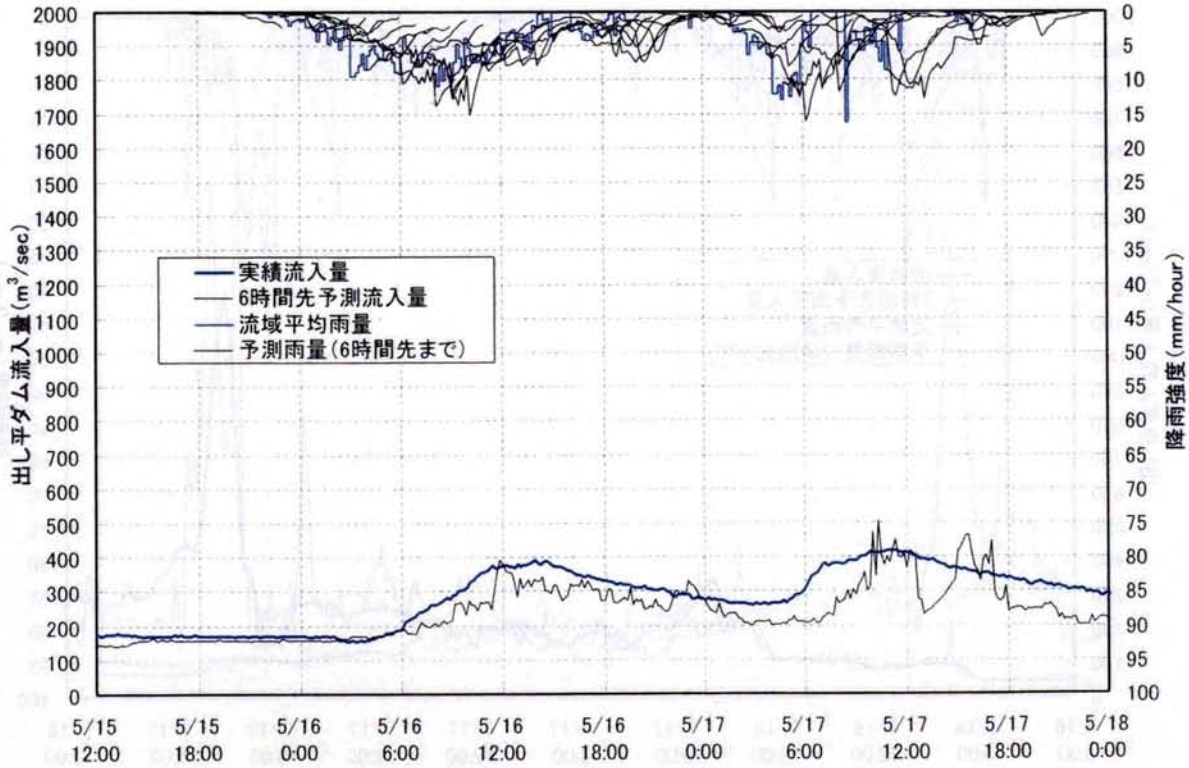
(b)　２時間先予測値のグラフ

図-5.3.4 (1)　流入量予測計算結果（2004 年 5 月 17 日出水）

（将来時刻雨量：予測値、黒部バルブ：維持放流量、黒４取水量：現在値を継続）



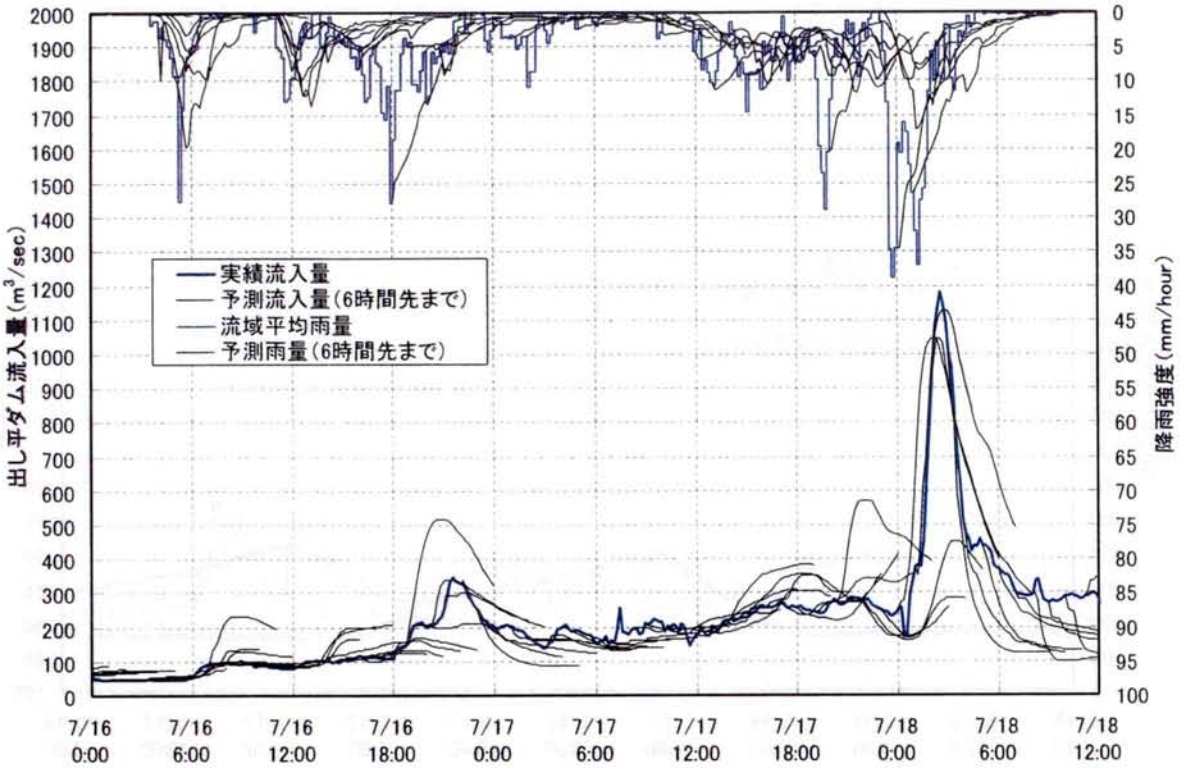
(c)　４時間先予測値のグラフ



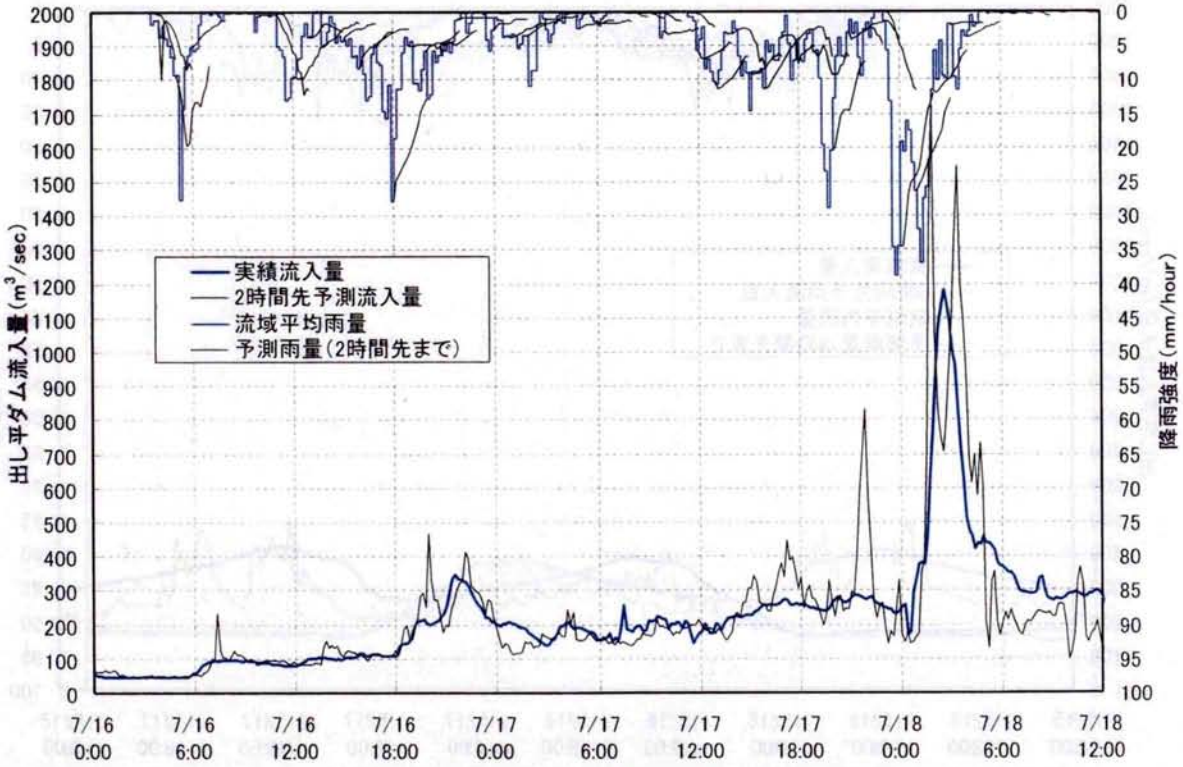
(d)　６時間先予測値のグラフ

図-5.3.4 (1)　流入量予測計算結果（2004 年 5 月 17 日出水）

（将来時刻雨量：予測値、黒部バルブ：維持放流量、黒４取水量：現在値を継続）



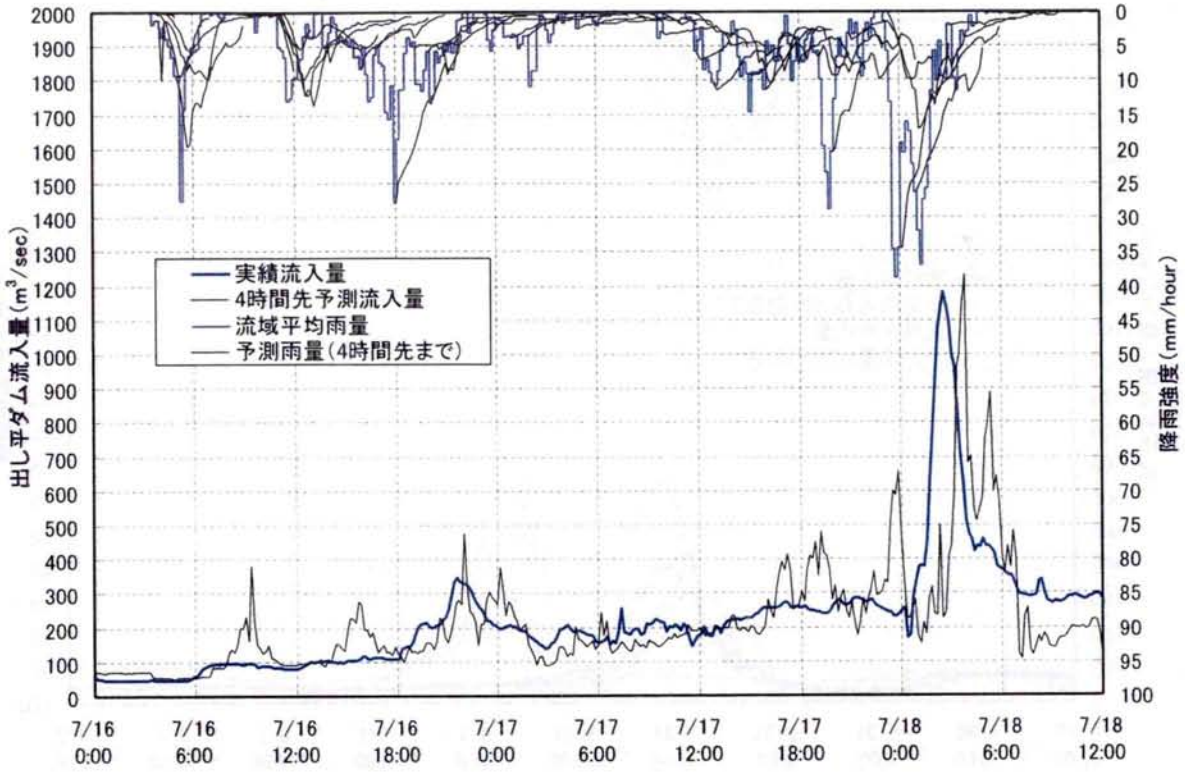
(a)　６時間先までの予測グラフ（毎正時起点）



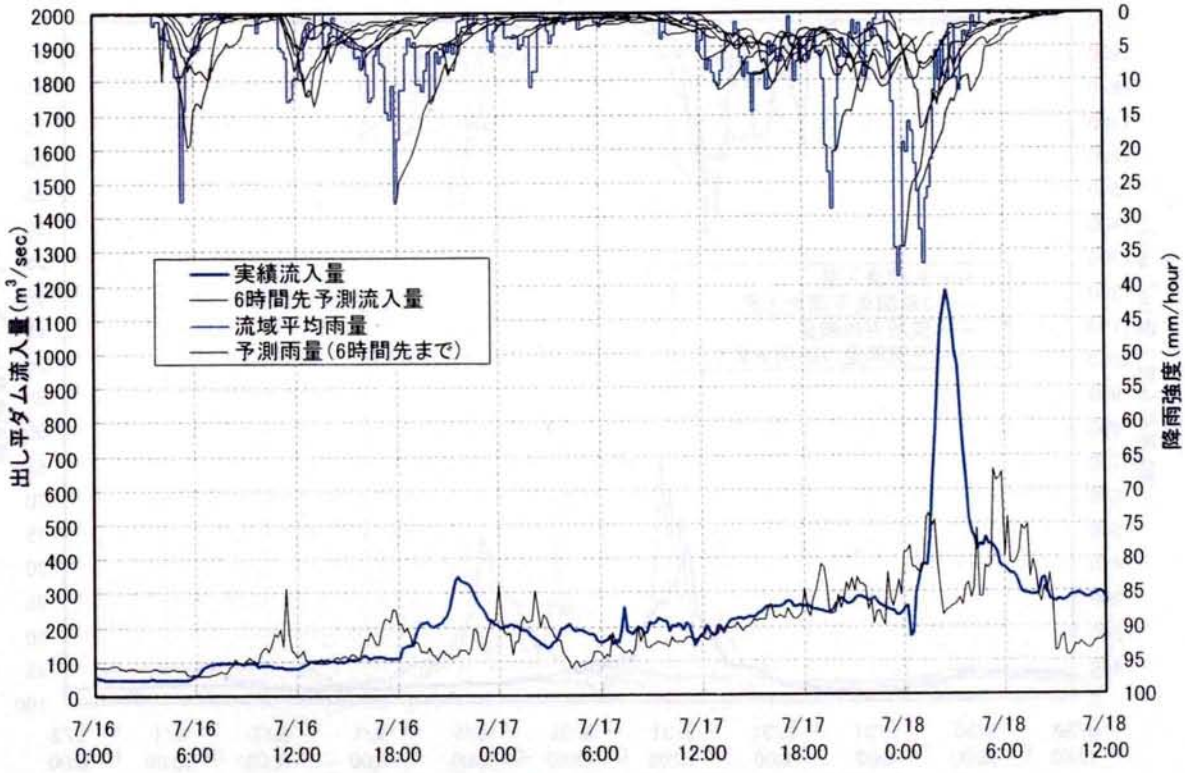
(b)　２時間先予測値のグラフ

図-5.3.4 (2)　流入量予測計算結果（2004 年 7 月 18 日出水）

（将来時刻雨量：予測値、黒部バルブ：維持放流量、黒４取水量：現在値を継続）



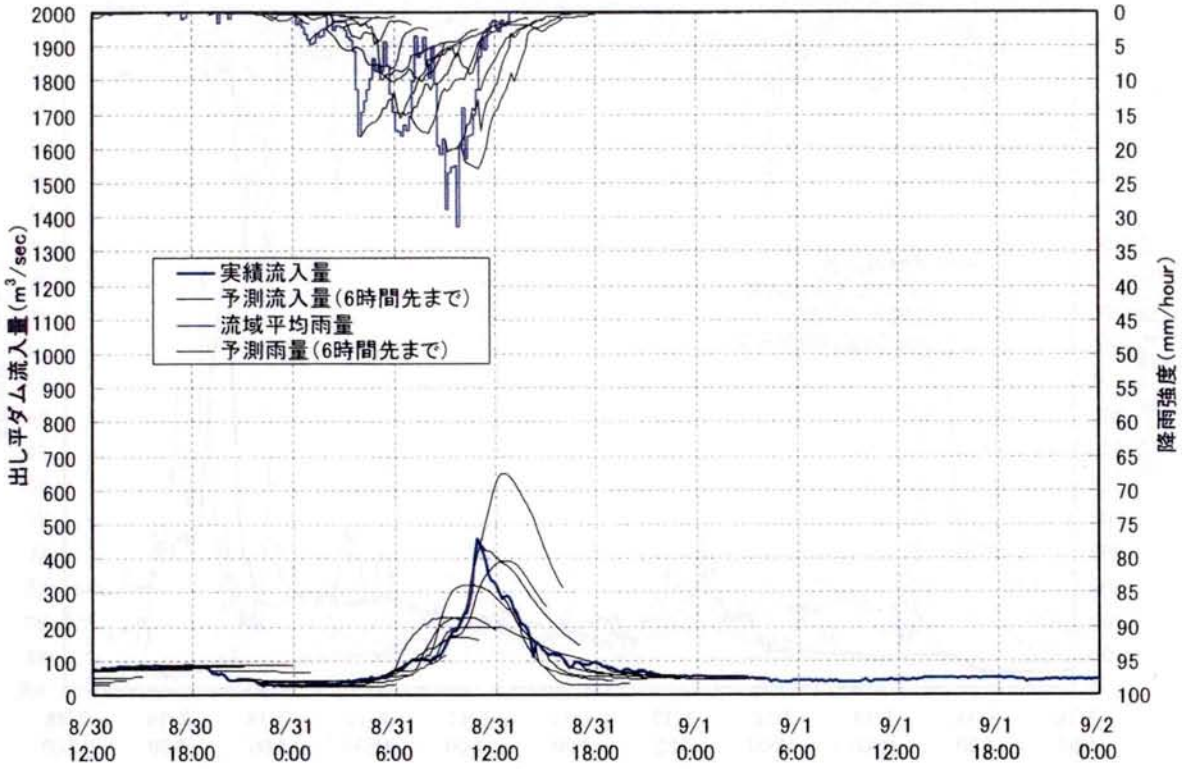
(c)　４時間先予測値のグラフ



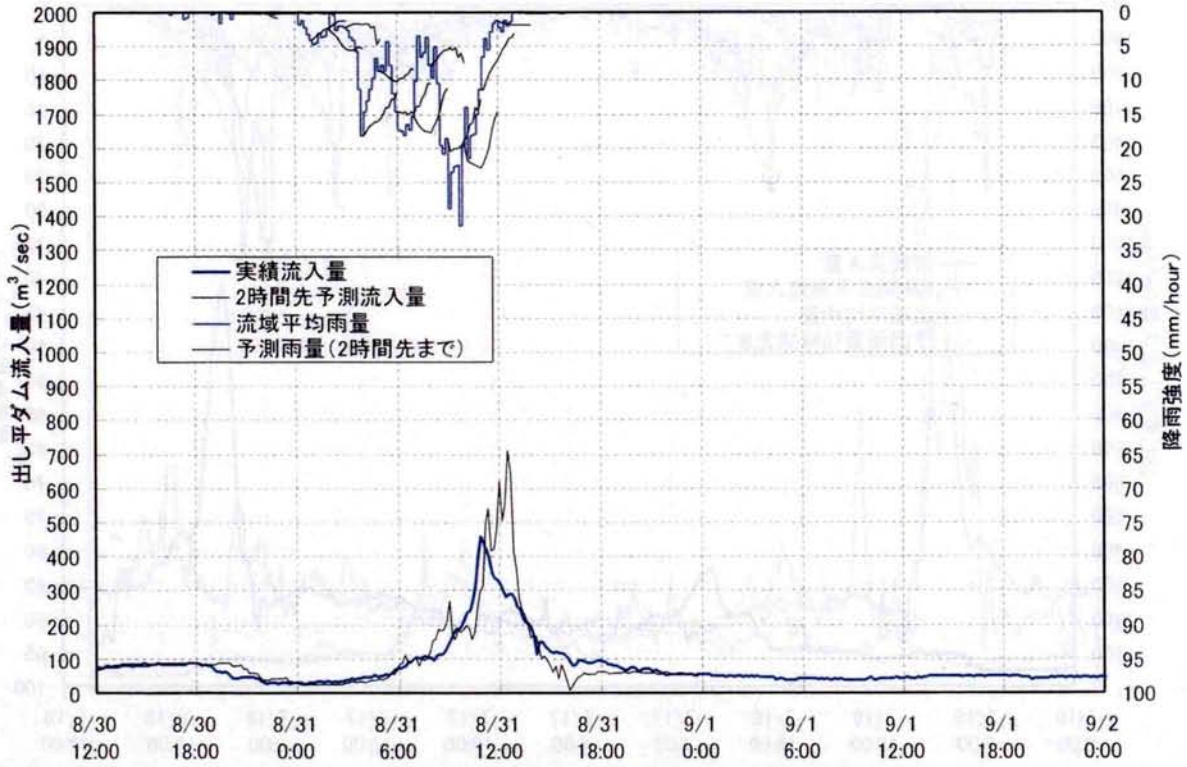
(d)　６時間先予測値のグラフ

図-5.3.4 (2)　流入量予測計算結果（2004 年 7 月 18 日出水）

（将来時刻雨量：予測値、黒部バルブ：維持放流量、黒４取水量：現在値を継続）



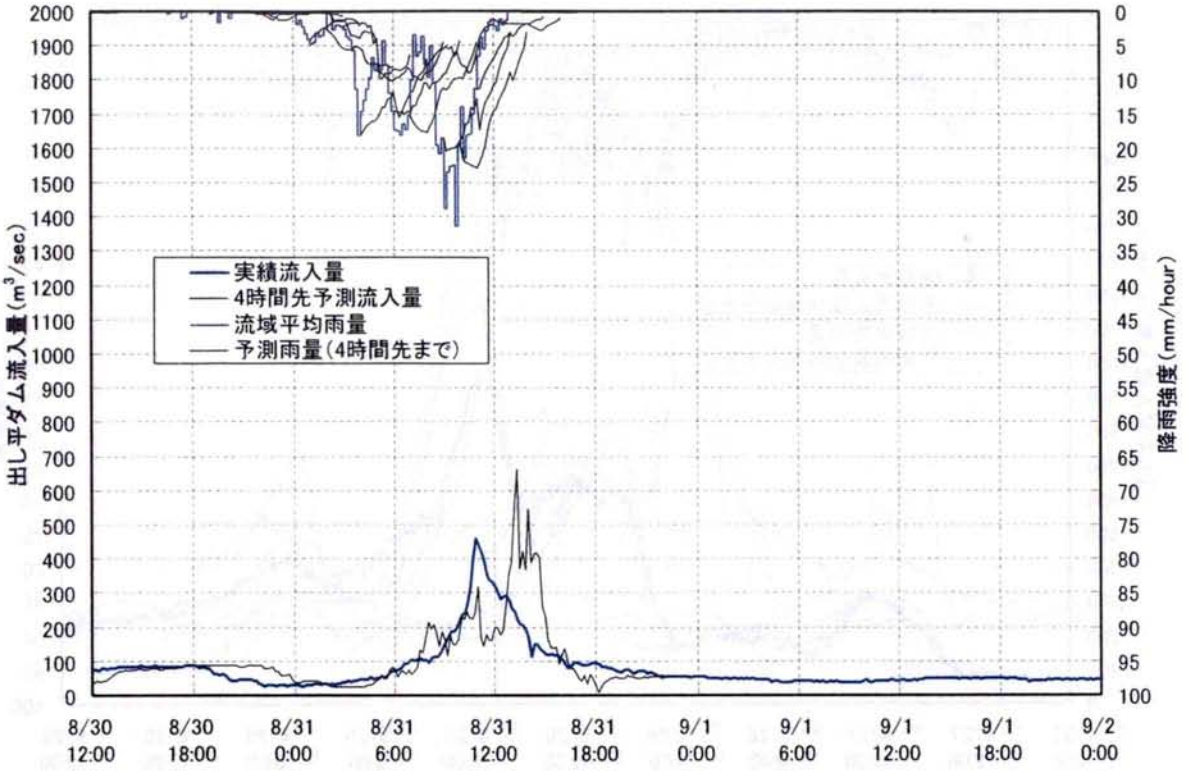
(a)　６時間先までの予測グラフ（毎正時起点）



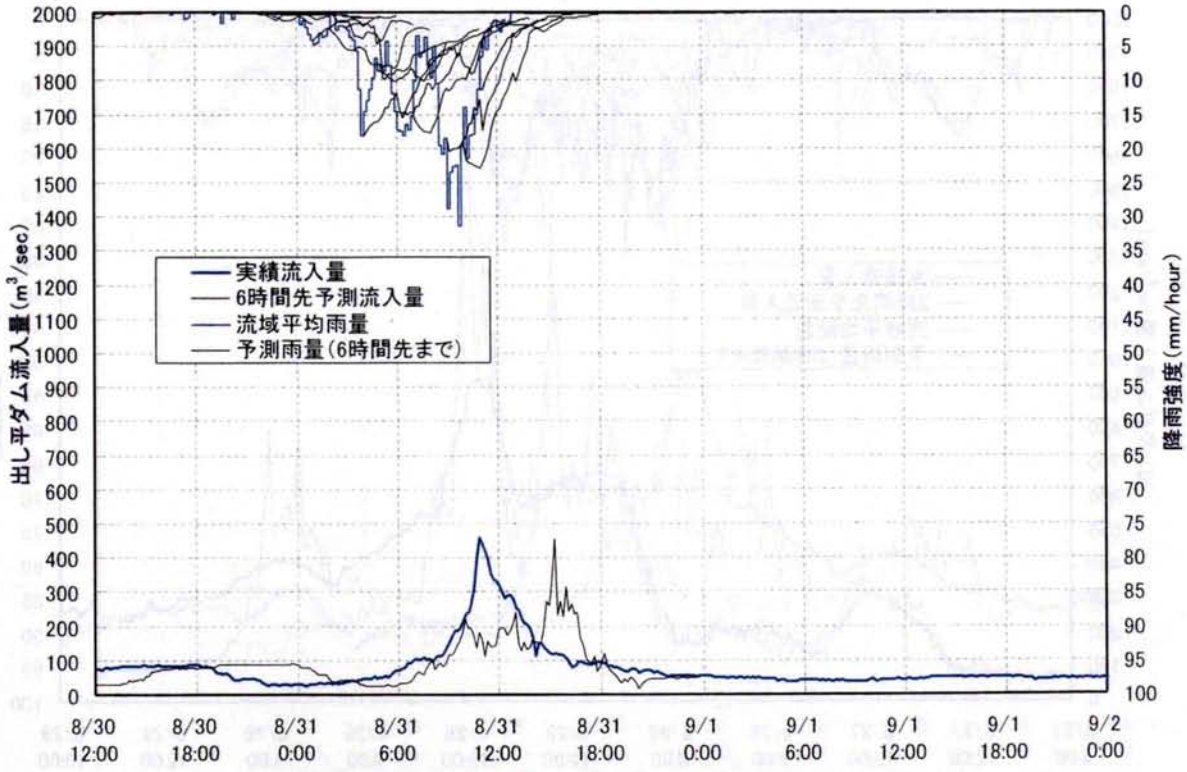
(b)　２時間先予測値のグラフ

図-5.3.4 (3)　流入量予測計算結果（2004 年 8 月 31 日出水）

（将来時刻雨量：予測値、黒部バルブ：維持放流量、黒４取水量：現在値を継続）



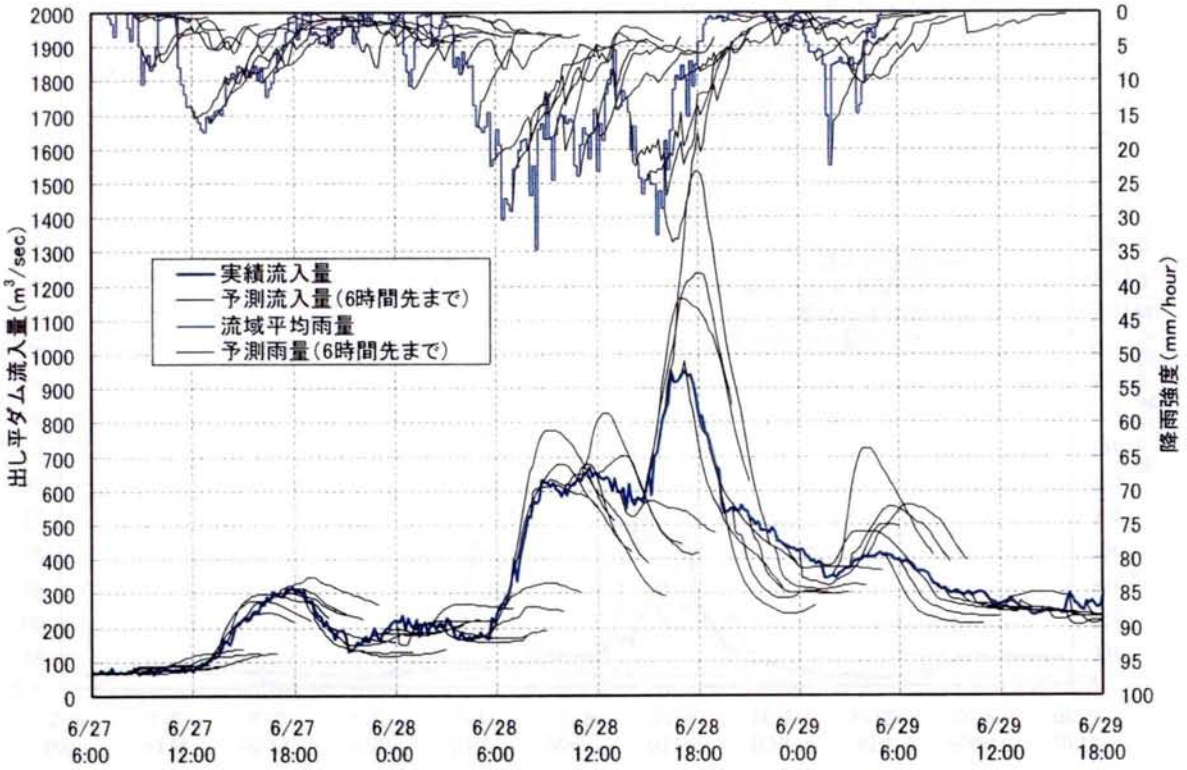
(c)　４時間先予測値のグラフ



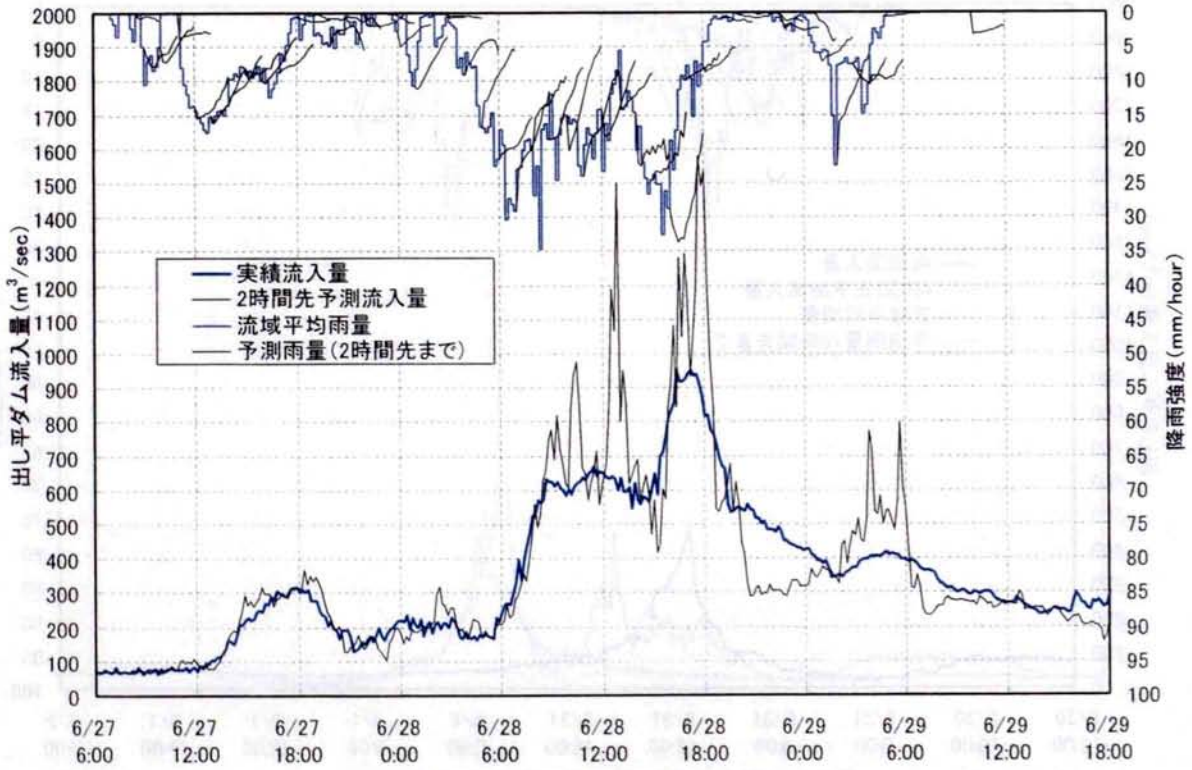
(d)　６時間先予測値のグラフ

図-5.3.4 (3)　流入量予測計算結果（2004 年 8 月 31 日出水）

（将来時刻雨量：予測値、黒部バルブ：維持放流量、黒４取水量：現在値を継続）



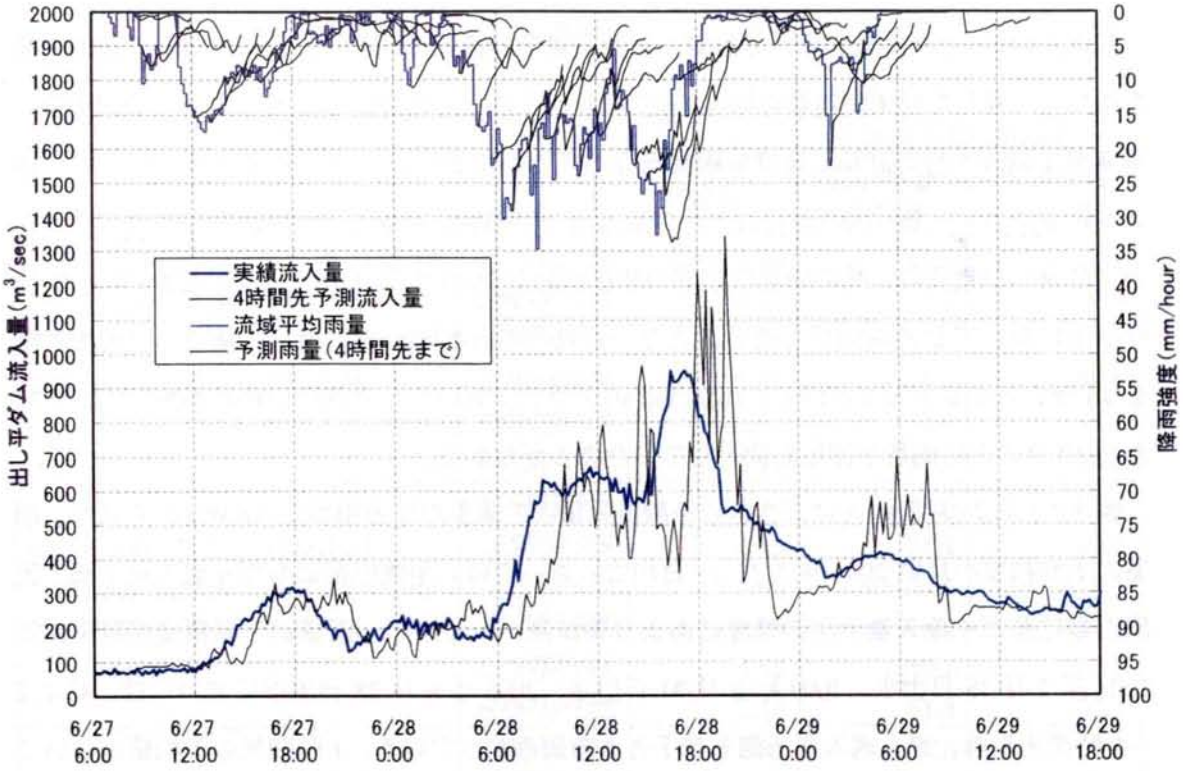
(a)　６時間先までの予測グラフ（毎正時起点）



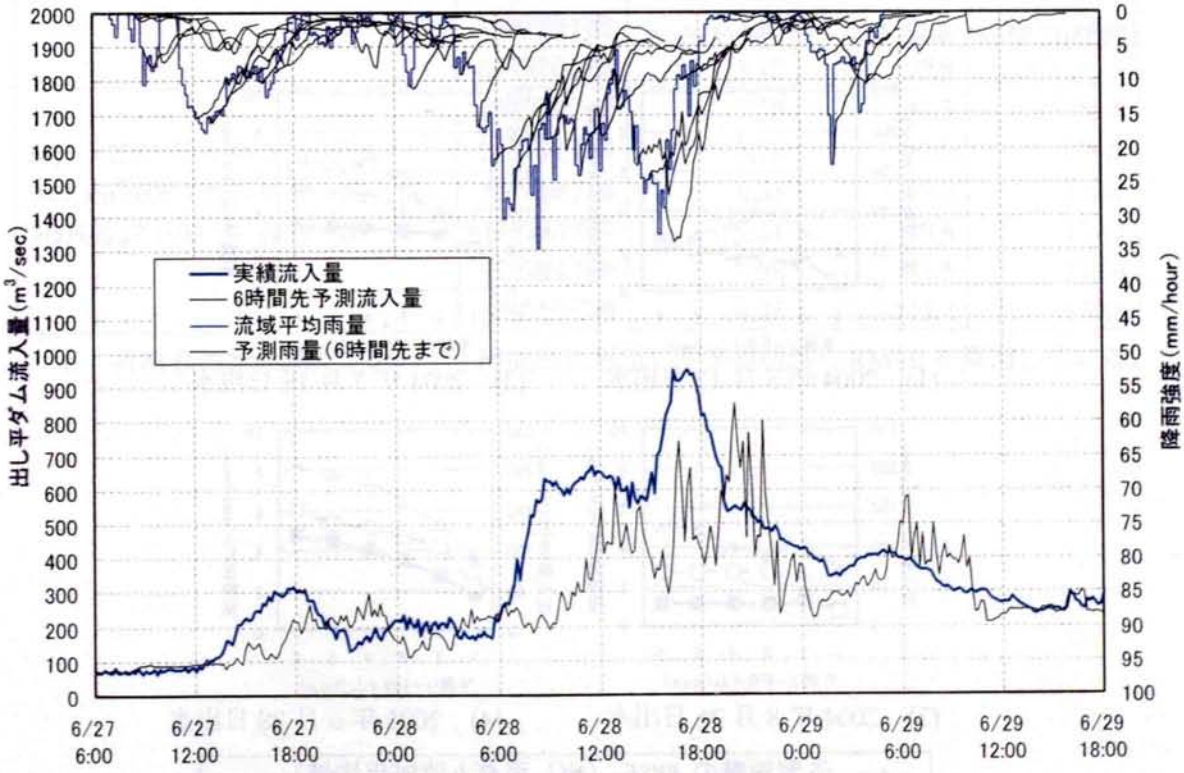
(b)　２時間先予測値のグラフ

図-5.3.4 (4)　流入量予測計算結果（2005 年 6 月 28 日出水）

（将来時刻雨量：予測値、黒部バルブ：維持放流量、黒４取水量：現在値を継続）



(c)　４時間先予測値のグラフ



(d)　６時間先予測値のグラフ

図-5.3.4 (4)　流入量予測計算結果（2005 年 6 月 28 日出水）

（将来時刻雨量：予測値、黒部バルブ：維持放流量、黒４取水量：現在値を継続）

図-5.3.4 は、予測雨量を用いて計算した流入量予測結果であるが、これに対し、実測雨量を用いて計算した結果が前章の図-4.4.6 であり、これらを比較することにより、予測雨量の精度が予測流入量の計算に及ぼす影響を見ることができる。2 時間先予測については、図-4.4.6、図-5.3.4 とも、ほぼ同様のグラフとなっているが、4 時間先予測については、グラフの形に違いが見られ、特に雨量に強弱の変化のある 2004 年 7 月 18 日出水、2005 年 6 月 28 日出水においてその傾向が大きい。また、これらの出水は、予測雨量に基づく予測流入量を 10 分ごとに算出して作図した(b),(c),(d)のグラフにおいて、予測値の振れが激しく、すなわち 10 分ごとに雨量予測値も変動していたことがわかる。

表-5.3.2 および図-5.3.5 に、これら予測流入量の二乗平均平方根誤差（RMSE）を示す。雨量の予測精度が良い 2004 年 5 月 17 日出水においては、予測雨量に基づく流入量予測と実測雨量に基づく流入量予測の精度にあまり差が無い。しかし、雨量の予測精度が若干劣る 2004 年 7 月 18 日出水、2004 年 8 月 31 日出水、2005 年 6 月 28 日出水においては、特に 2～3 時間先以降、ダム流入量予測も若干劣る結果となっている。1 時間先の予測値については、実測雨量を用いた計算も予測雨量を用いた計算もあまり精度に差がなく、すなわち、流出現象の遅れ時間の効果により、1 時間先程度までは、予測雨量よりも実測雨量の影響が支配的に働いているということがわかる。

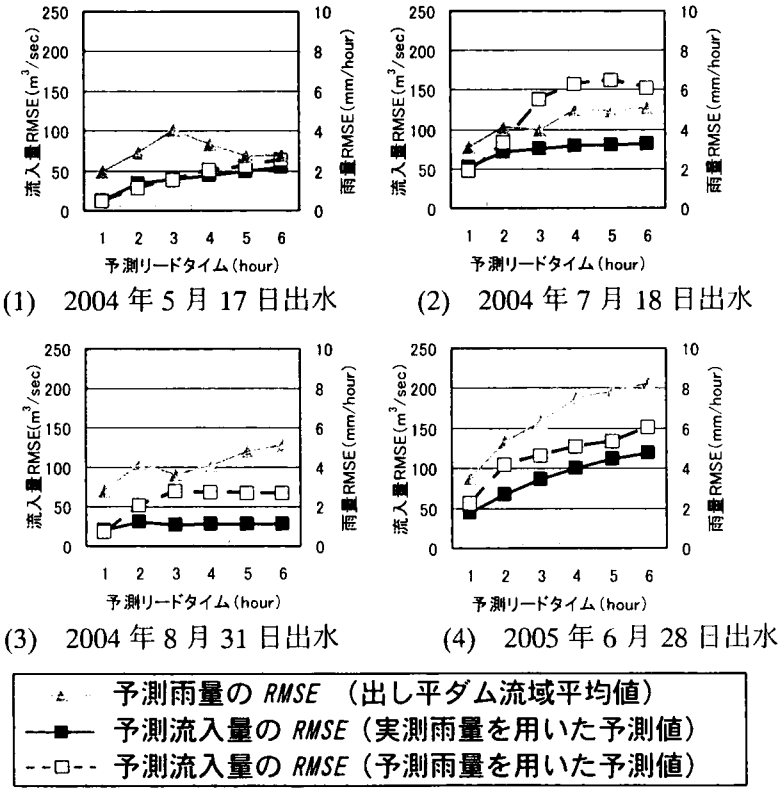


図-5.3.5　平均二乗誤差の平方根（RMSE）

表-5.3.2　平均二乗誤差の平方根（RMSE）

		予測雨量の RMSE*	予測流入量のRMSE*	
			実測雨量を使用	予測雨量を使用
(1)　2004 年 5 月 17 日出水 418.7m^3/sec（出し平ダム流入量） 2004/5/16 0:00 ～ 5/18 5:00	1時間後予測	1.96	13.3	11.1
	2時間後予測	2.97	33.7	27.5
	3時間後予測	4.04	39.8	37.7
	4時間後予測	3.34	44.7	50.8
	5時間後予測	2.77	50.0	55.7
	6時間後予測	2.81	54.5	64.0
(2)　2004 年 7 月 18 日出水 1,182.6m^3/sec(出し平ダム流入量) 2004/7/17 1:00 ～ 7/19 4:00	1時間後予測	3.14	51.9	47.4
	2時間後予測	4.13	71.2	82.8
	3時間後予測	3.96	75.4	138.1
	4時間後予測	4.99	78.8	156.6
	5時間後予測	4.96	80.2	162.0
	6時間後予測	5.12	81.6	152.1
(3)　2004 年 8 月 31 日出水 458.1m^3/sec（出し平ダム流入量） 2004/8/30 4:00 ～ 9/1 4:00	1時間後予測	2.82	20.6	18.2
	2時間後予測	4.23	30.4	51.3
	3時間後予測	3.62	26.7	68.7
	4時間後予測	4.10	28.5	68.1
	5時間後予測	4.83	28.5	66.5
	6時間後予測	5.12	27.9	66.1
(4)　2005 年 6 月 28 日出水 949.1m^3/sec（出し平ダム流入量） 2005/6/27 1:00 ～ 6/30 5:00	1時間後予測	3.50	44.3	55.5
	2時間後予測	5.33	67.6	104.1
	3時間後予測	6.33	85.9	115.7
	4時間後予測	7.51	99.8	127.2
	5時間後予測	7.88	111.6	133.4
	6時間後予測	8.25	119.4	150.6

＊　各出水の対象期間において１時間毎に算出した予測値から RMSE を算出している。

５．４　結語

本章では、第３章で述べた降雨予測手法および第４章で述べた流出予測手法を統合してダム流入量を実時間で予測するシステムを構築し、黒部川水系における電力ダム群において実運用を行った結果について述べた。

このシステムは、黒部川流域の 3 ダムを対象として、気象庁の配信するアメダスデータ、合成レーダーデータおよび GPV データ、ならびにダム地点において関西電力が独自に設置している雨量計データ、実測のダム流入量データ、発電所運転データ等を受信し、6 時間先までの降雨量および各ダム流入量の予測を行うものである。また、この予測計算は実時間で行い、10 分毎に最新データをもとに更新が行われる。さらに、予測結果については、直感的に把握可能なグラフ表示と、ダム操作やダム排砂に関する各種制限値、規定値との比較を行うための数値表示の双方によるものとし、イントラネットワークを通じて配信することでシステム設置地点のみならず、同ネットワーク環境にある関係各事業所において参照、閲覧が可能なものとした。

本システム導入後、2005 年度より実運用を開始している。その結果、目的のひとつである出水時における出し平ダム排砂体制の判断に際しての参考情報として利用している。もう一つの目的である災害への対応としては、幸いにもシステム導入後は、過去に多大な被害を受けたような規模の出水は生じていないが、今後、そのような大規模出水の予測がなされた場合には早期対応に大きく資するものと考えられる。

本研究の成果により、ダム管理の実務において十分に利用可能なダム流入量予測システムを構築した。今後も日進月歩である気象・降雨予測、流出予測に関する知見、研究成果を取り込むことでさらなるスパイラルアップを図り、ダム運用の実務における利用価値の向上が可能であると考えられる。

第５章　参考文献

1) 橋本徳昭，藤田 暁，椎葉充晴，立川康人，市川 温：分布型流出モデルに基づくダム流入量予測システムの構築，水工学論文集，第 50 巻，pp.289-294，2006.

結　論

本論文は、黒部川水系を研究対象フィールドとして、最新の水文解析の研究成果と気象庁の発表する気象情報配信システムおよびダム管理者が独自に観測する気象・水文データを組み合わせて、「水系ダム群の洪水吐ゲート操作を良い精度で支援しうる降雨～流出予測システム」の開発を目指して行った一連の研究の成果を取りまとめたものである。

各章で得られた結論は以下のとおりである。

第１章では、電力ダムの運用の実態と課題を整理した後、ダムを適切に運用、管理していくためには、精度の高いダム流入量予測が必要であることを論じた。

まず、電力ダムの役割や歴史を述べた後に、ダムを設置することによって生じる悪影響を示し、これを未然に防ぐために、電力ダムのような利水ダム管理者にとっては、積極的な治水量の役割は義務付けられていないものの、河川の従前の機能を維持し、危害防止の措置等を行う責務があること、この責務を全うするために、各ダムにはダム操作規程が定められることを述べた。つぎに、ダム操作規程の具体的内容および、それに基づいた具体的なダム操作の方法を概説した。さらに、ダムに係わる社会的紛争として、ダム管理者あるいは河川管理者を被告とする訴訟の事例を紹介した。これらを踏まえ、電力ダムの管理者に課せられた運用上の課題をまとめた。

第３節においては、本研究を進める上での具体的な動機付けについて紹介した。まず、本研究の主目的である降雨予測と流出予測の現状とこれまでのリアルタイムダム流入量予測システムの事例について整理した。続いて、第２節の最後でまとめた電力ダムの管理者に課せられた運用上の課題として

①ダム操作信頼性の向上

②災害への対応

③出水時の体制確保

④最適発電運用

を挙げ、それらの課題解決のため、精度の高いダム流入量予測の必要性を論じた。最後に、本研究を進めるにあたり、具体的な研究フィールドとして、黒部川を選定したことを述べた。これは、著者の所属する関西電力（株）において、重要な水力電源地帯であるためであり、黒部川で特に求められるダム流入量予測のニーズについてとりまとめ、次章以降で説明するダム流入量予測システムの必要事項を明らかにした。

第２章では、黒部渓谷の気象・降雨特性を解明すべく、地上雨量データの分析および現地観測を実施した結果について述べた。第２章で得られた結論をまとめると次のとおりである。

（１）地上雨量データの解析により判明した特性

①全般的な特性

最大４時間、最大24時間雨量ともに平野部に比べ、山岳域である黒部峡谷付近の降雨量が大きいことがわかる。特に最大 4 時間雨量においてその傾向が顕著である。また、黒部峡谷付近では「立山」、「刈安」の立山稜線～黒部川上流域で、最大 4 時間雨量、最大24時間雨量とも極大となる「黒部川上流域降水量極大傾向」が見られる。

②降雨成因別特性

今回抽出した全 204 降雨事例は、低気圧、前線＋低気圧、前線、台風のいずれの降雨成因においても「黒部川上流域降水量極大傾向」が見られる。

③季節別特性

四季のうちでは夏季が最も降雨量が多く、また「黒部川上流域降水量極大傾向」が顕著に見られる。また降水時間数は冬季に最も大きい値を示しており、降雨時間に比べ降雪時間が長いことを示す。

④降雨規模別特性

黒部川中流域に位置する出し平ダム地点の最大 4 時間雨量に基づき降雨規模を層別化して解析した結果、「黒部川上流域降水量極大傾向」は、降雨規模が 15mm 以上 50mm 未満において顕著に見られる。一方、降雨規模が 50mm 以上の場合の最大 4 時間雨量は出し平ダム、小屋平ダム付近の中流域が上流域よりも大きくなる。

⑤高層風の風向別特性

黒部峡谷に最も近い「輪島」での高層風観測値を用いて、黒部峡谷の降雨特性を解析した結果、黒部峡谷の降雨時には南西～西の風向が卓越しており、この風向の時に「黒部川上流域降水量極大傾向」が最も顕著となっている。

⑥大気安定度別特性

黒部峡谷内の各地点は SSI が小さくなる、すなわち大気の状態が不安定になるのにともない、降雨量が大きくなる傾向がある。また SSI<-2 の階層、すなわち最も大気の状態が不安定な事例では、「立山」地点ではその他の事例と差がないが、黒部峡谷内の最上流の「刈安」地点から下流域にかけてはその他事例に比べ大きな降雨量を示してお

り、特に中流域の「仙人谷ダム」「小屋平ダム」「出し平ダム」地点においてこの傾向は顕著である。このことは、上空の大気安定度と黒部川峡谷内の降雨現象に密接な関係があり、大気の状態が不安定であると黒部峡谷内の特に中下流域に大雨をもたらす可能性があることを示唆している。

⑦豪雨事例の特性

出し平ダム地点での最大 4 時間雨量が 90mm を越える豪雨事例 5 事例を対象として解析を行った結果、前線に起因する降雨で、輪島での SSI の最小値が-2(K)未満と極めて大気の状態が不安定、さらに輪島の高層風向は西風系の場合、特に黒部川中下流域で豪雨となっていることがわかった。

（2）梅雨期集中観測から得られた知見

①観測手法の有効性

1998 年の予備観測によって、ミニレーダー、GPS ゾンデが黒部峡谷内の降雨・気象特性を把握するための有効な手段であることがわかった。

②黒部峡谷周辺の降雨発達特性

1999 年～2001 年に実施したドップラーレーダー観測から、黒部峡谷周辺の風系と降雨分布の間に明確な関係があること、黒部峡谷周辺の典型的な降雨パターンとして、山岳地形によって水蒸気を多く含んだ大気が強制上昇し冷却され、水蒸気から雨滴へ変化するという、顕著な地形性の降雨停滞・発達機構を見出した。

（3）降雨予測手法への展開方法

①黒部峡谷の典型的な降雨パターンとして顕著な地形性の降雨停滞・発達機構が見出されたため、これを表現しうる適切な地形性降雨モデルを導入することが必要である。

②黒部峡谷における豪雨の発生と大気安定度には密接な関係があることが見出されており、この現象を踏まえた豪雨に対応する降雨予測モデルの開発を行うことが必要である。

第 3 章では、急峻な山岳域における降雨予測手法の開発と高度化について論じた。

まず、各種の降雨予測手法について整理した後、運動学的手法に黒部渓谷特有の降雨停滞特性や降雨発達特性などを考慮する運動学的予測モデルを開発した。1～6 時間先までの

最適な降雨予測のため、この運動学的手法に水蒸気量が逐次修正される同化手法を適用した物理的手法を最適に合成させる手法を開発した。その結果、予測降雨分布と実況雨量分布との比較、気象庁降水短時間予報および開発手法での予測雨量の時系列による比較および各種精度指標による比較より、開発したハイブリッド降雨予測モデルは気象庁での予測結果と比べ優れた精度を有し、また実用的な精度が確保できるとの結論を得た。

つぎに、降雨予測に関する最新の技術として可降水量データおよび気象庁配信の最新データであるMSMデータ、ウインドプロファイラ、1kmメッシュ合成レーダーデータを取り上げ、これらを活用して予測精度を向上させる手法について述べ、その効果の検証を行った。その結果、まず可降水量データの活用による降雨予測手法の高度化に関して、富山平野において水蒸気ラジオメータにより可降水量の現地観測を行い、可降水量変動と降雨量の関係について考察した結果、可降水量は降雨の発生に先行して変動することが確認できた。つぎに地上気象データ、気象衛星データを用いた可降水量推定式を提案し、可降水量を用いた降雨予測開始指標を実時間で利用可能とした。これらの知見をハイブリッド降雨予測モデルに適用した結果、ダム操作上重要な出水の立ち上がりを予測するのに重要な、降雨開始のタイミングおよび降雨量の予測精度に改善の効果があることが確認できた。さらに、気象庁配信の最新データであるMSMデータ、ウインドプロファイラ、1kmメッシュ合成レーダーデータの活用手法を具体的に提案し、可降水量の活用も含めて、ハイブリッド降雨予測モデルに適用した結果、予測精度が向上することを確認できた。以上により、可降水量データおよび気象庁最新プロダクトであるMSMデータ、ウィンドプロファイラ、1km メッシュ合成レーダーデータは、ハイブリッド降雨予測モデルの高度化に有効であるとの結論を得た。

第４章では、前章までに述べた降雨予測を用い、ダムへの流入量を予測する手法について検討した。

メッシュ形式の雨量データが有する空間的な降雨の分布状況の情報を活かし、また、山岳域における地形の影響を考慮した流出計算を行えるように、分布型の流出モデルをベースにした河川流量の計算を行うものとし、また、ダムにおいて得られる流入量の実測データを流出計算に適切にフィードバックさせられるように、河道のモデルに対してカルマンフィルタを適用するものとした。

まず第２節で従来の流量予測について概観し、第３節において、本研究におけるダム流入量予測システムの計算手法を示した。斜面における流出の計算には集中化された表面

流・中間流統合型 kinematic wave モデルを用い、河道における流れの計算には河道網集中型 kinematic wave モデルを用いるものとした。このうち河道網集中型 kinematic wave に対してはカルマンフィルタを適用し、ダムにおいて得られる流入量の実測値の情報を適切に計算にフィードバックできるモデルを構築した。さらに、累加雨量に応じて流出率を変化させながら有効降雨を算定すること、および、融雪の影響を考慮した基底流量を与えること等により、実運用に耐えられるよう精度向上を図った。

つぎに第4節において、構築した手法による流出予測シミュレーションを実施し、出水の立ち上がり、ピーク値等について良好な予測精度を確認した。

第5章では、第3章で述べた降雨予測手法および第4章で述べた流出予測手法を統合してダム流入量を実時間で予測するシステムを構築し、黒部川水系における電力ダム群において実運用を行った結果について述べた。

このシステムは、黒部川流域の3ダムを対象として、気象庁の配信するアメダスデータ、合成レーダデータおよび GPV データ、ならびにダム地点において関西電力が独自に設置している雨量計データ、実測のダム流入量データ、発電所運転データ等を受信し、6時間先までの降雨量および各ダム流入量の予測を行うものである。また、この予測計算は実時間で行い、10 分毎に最新データをもとに更新が行われる。さらに、予測結果については、直感的に把握可能なグラフ表示と、ダム操作やダム排砂に関する各種制限値、規定値との比較を行うための数値表示の双方によるものとし、イントラネットワークを通じて配信することでシステム設置地点のみならず、同ネットワーク環境にある関係各事業所において参照、閲覧が可能なものとした。

本システム導入後、2004 年度の試運用を経て 2005 年度より実運用を開始している。その結果、目的のひとつである出水時における出し平ダム排砂体制の判断に際しての参考情報として活用している。もう一つの目的である災害への対応としては、幸いにもシステム導入後は、過去に多大な被害を受けたような規模の出水は生じていないが、今後、そのような大規模出水の予測がなされた場合には早期対応に大きく資するものと考える。

思い返すと、著者が電力会社に在籍して既に 30 年以上が経過しているが、その間の大半は水力電源開発と水力発電所の保全運用業務に従事してきた。このうち保全運用に本格的に携わるようになったのは、1990 年 7 月に関西電力（株）北陸支社に赴任した時からである。当時北陸支社は、黒部川、神通川、庄川と九頭竜川の 4 水系で 33 の水力発電所を運営

しており、それに伴い洪水吐ゲート操作を伴うダム（関西電力が直接管理している多目的ダムを含め）は 19 を数えていた。緒論にも記したように、当時ダム勤務員は出水時にあって自分ひとりの経験と勘を頼りに、少しでも水を無駄にすることなく水力発電に有効活用したいという「使命感」の下に、頑張るだけ頑張ってダム水位を高水位に保とうとする姿勢と、ダム操作規定を遵守しなければならないという「義務」との板ばさみに苦労し、時にはゲート操作するタイミングを失するような事態を引き起こしていた。こうした状況を改善すべく、関西電力では 1980 年代からダム勤務員を支援するシステムの開発に取り組み、著者が北陸支社に赴任する直前に、神通川水系角川ダムに「高機能卓」の第 1 号機が配備された。現場での使用実績が増すにつれ、ダム流入量予測システムの精度如何でダム勤務員の精神的負担感が解消するどころか、誤った予測に振り回されて、反対に緊張感が増しているケースも散見され、予測精度向上の重要性を目の当たりにした次第である。

こうした状況は現在に至るも一部のダムを除いて大筋において改善されていないと言わざるを得ない。

しかし、本研究で明らかにしたように、最新の気象官署からの配信データ、水文学の進歩と IT 技術の進歩を組み合わせることにより、急峻な山岳域に位置する黒部川水系のダム群の実運用に耐える精度を備えた流入量予測システムを完成させることができた。改善点はまだいくつかあるものの、今回開発した手法を適宜組合せ、修正することにより、近い将来関西電力のダム群全体に同様の予測システムを導入できる可能性が出てきたわけであり、ダム管理者に対し力強い実運用ツールを提供できたと確信している。

さらに、昨今、地球温暖化に起因する異常気象かと見紛う現象が往々にして見受けられる。国土交通省にあっては洪水調節容量の確保の観点から既設の特定多目的ダムから出水前に事前放流を行うことでこうした降雨状況の変動に対処しようとしている。ここにはダム事業参加者である電力の効用減の問題が潜在しており、今後調整を要する課題となると考える。このように治水の観点からは、洪水防御上、事前にダム水位を下げて洪水を待ちたいというニーズがあり、一方利水側、特に電力サイドは水力ポテンシャルの有効利用上、できる限りダム水位は高水位に保っていたいというニーズがあり、両者が拮抗した形となってしまう。洪水防御は流域の生命・財産の安全を確保するうえで、まず第一に考慮されるべきであることは言を待たないが、純国産循環エネルギーである水力の有効活用は地球温暖化対策上の揺るがせにできない課題である。

本研究はこのような水運用上両立させにくい課題を現実的に同時達成させていく有効なツールの一つを提供する端緒を開いたものであるとも考える。

謝　辞

本研究は平成 11 年以来実に 7 年の長きに亘り行ってきたものであり、多くの方々のご指導、ご協力の賜物であります。

本研究をこのような形に纏めるにあたり、その機会をお与え頂いた京都大学防災研究所池淵周一教授にまずもって心から感謝と御礼を申し上げます。

また、本研究の遂行にあたり、京都大学　椎葉充晴教授、京都大学防災研究所　中北英一教授、京都大学防災研究所　立川康人助教授、山梨大学　大石　哲助教授、京都大学　市川　温助手の諸先生には、研究方法、内容について数々のご教示、ご助言を頂くとともに、論文作成に当たり貴重なご意見を賜りました。ここに深く感謝申し上げます。

さらに、本研究の遂行の途上、多くのデータの取得、分析等を行う必要がありましたが、筆者の所属する関西電力（株）はじめ多くの関係者の方々のお力添えを頂戴しました。とくに関西電力（株）土木建築室土木グループ　片岡幸毅チーフマネジャー、梅﨑昌彦リーダー、木村哲也氏、（株）ニュージェック　藤田　暁氏、（株）気象工学研究所　小久保鉄也社長、高田　望氏には多くの時間をご提供下さいましたこと、ここに衷心より御礼申し上げます。

付録

付録　1

解析対象雨量観測地点

	地点名	地点番号	緯度	経度	標高(m)
アメダス観測点	白馬	48141	36 度 41.7 分	137 度 51.9 分	703
	大町	48191	36 度 31.2 分	137 度 50.2 分	784
	燕岳	48292	36 度 23.2 分	137 度 44.5 分	1840
	穂高	48296	36 度 20.5 分	137 度 53.1 分	540
	上高地	48346	36 度 14.7 分	137 度 38.2 分	1510
	奈川	48466	36 度 5.3 分	137 度 41.2 分	1068
	河合	52041	36 度 18.2 分	137 度 6.2 分	471
	神岡	52051	36 度 19.2 分	137 度 18.8 分	455
	白川	52081	36 度 16.3 分	136 度 54.0 分	478
	栃尾	52111	36 度 14.8 分	137 度 30.6 分	765
	御母衣	52131	36 度 8.5 分	136 度 54.7 分	640
	清見	52137	36 度 10.7 分	137 度 2.9 分	740
	高山	52146	36 度 9.2 分	137 度 15.4 分	560
	丹生川	52152	36 度 11.1 分	137 度 22.6 分	910
	乗鞍岳	52161	36 度 7.2 分	137 度 33.6 分	2730
	糸魚川	54711	37 度 2.1 分	137 度 51.9 分	10
	平岩	54876	36 度 53.1 分	137 度 52.0 分	260
	泊	55021	36 度 57.0 分	137 度 33.3 分	13
	氷見	55041	36 度 51.6 分	136 度 57.8 分	7
	魚津	55056	36 度 49.2 分	137 度 25.8 分	48
	宇奈月	55063	36 度 50.7 分	137 度 33.6 分	160
	伏木	55091	36 度 47.3 分	137 度 3.4 分	12
	富山	55102	36 度 42.4 分	137 度 12.3 分	9
	砺波	55141	36 度 37.6 分	136 度 57.3 分	58
	大山	55156	36 度 36.3 分	137 度 17.2 分	128
	上市	55166	36 度 40.1 分	137 度 25.6 分	296
	福光	55191	36 度 32.6 分	136 度 52.5 分	91
	八尾	55206	36 度 34.5 分	137 度 8.2 分	78
	立山	55226	36 度 34.5 分	137 度 35.0 分	2340
	平	55251	36 度 25.9 分	136 度 57.2 分	282
	猪谷	55267	36 度 28.2 分	137 度 14.4 分	215
	富来	56116	37 度 8.8 分	136 度 45.2 分	10
	七尾	56146	37 度 1.8 分	136 度 58.3 分	14
	羽咋	56176	36 度 53.3 分	136 度 46.9 分	15
	宇ノ気	56186	36 度 42.6 分	136 度 41.7 分	42
	宝達山	56191	36 度 46.7 分	136 度 48.7 分	626
	金沢	56227	36 度 35.2 分	136 度 38.3 分	6
	医王山	56231	36 度 31.6 分	136 度 47.1 分	660
	鳥越	56286	36 度 21.5 分	136 度 37.1 分	180
	白峰	56346	36 度 10.4 分	136 度 37.7 分	480
関西電力観測点	柳河原ダム		36 度 47.9 分	137 度 35.5 分	260
	出し平ダム		36 度 45.4 分	137 度 38.1 分	360
	小屋平ダム		36 度 42.4 分	137 度 39.1 分	440
	仙人谷ダム		36 度 38.8 分	137 度 41.1 分	860
	刈安		36 度 31.7 分	137 度 37.4 分	1960
	雲ノ平		36 度 25.1 分	137 度 34.9 分	2560
	黒部ダム		36 度 33.8 分	137 度 40.1 分	1440

付録　2

解析対象降雨事例(1)

降雨番号	降雨開始日			降雨終了日			立山		宇奈月		白馬		降雨原因
	年	月	日	年	月	日	総雨量	最大1時間雨量	総雨量	最大1時間雨量	総雨量	最大1時間雨量	
1	1988	6	27	1988	6	28	29	5	13	3	66	17	停滞前線
2	1988	6	29	1988	7	1	98	12	91	11	38	5	低気圧
3	1988	7	3	1988	7	4	92	13	41	13	44	13	低気圧
4	1988	7	7	1988	7	8	100	20	43	22	29	7	停滞前線＋低気圧
5	1988	7	9	1988	7	11	151	26	84	13	64	12	停滞前線
6	1988	7	20	1988	7	21	107	26	32	11	57	20	停滞前線＋低気圧
7	1988	7	27	1988	7	28	103	11	44	7	57	7	低気圧
8	1988	8	17	1988	8	18	6	2	13	3	82	32	熱帯低気圧
9	1988	8	23	1988	8	24	36	17	28	26	64	13	低気圧
10	1988	8	26	1988	8	27	7	1	99	22	9	9	停滞前線
11	1988	9	10	1988	9	13	149	21	142	21	91	11	低気圧
12	1988	9	20	1988	9	21	32	9	57	19	9	3	停滞前線＋低気圧
13	1988	10	5	1988	10	7	0	0	87	12	43	4	停滞前線＋低気圧
14	1988	10	12	1988	10	14	0	0	84	19	23	4	低気圧
15	1988	11	13	1988	11	14	0	0	66	19	6	1	低気圧
16	1989	1	18	1989	1	21	0	0	127	12	98	5	低気圧
17	1989	6	27	1989	6	28	50	8	45	8	61	12	停滞前線＋低気圧
18	1989	7	8	1989	7	10	128	17	55	11	41	10	停滞前線＋低気圧
19	1989	7	11	1989	7	14	190	23	115	31	83	11	停滞前線
20	1989	7	24	1989	7	24	3	1	0	0	60	36	大気不安定
21	1989	8	6	1989	8	7	74	12	76	6	9	3	台風
22	1989	8	14	1989	8	15	61	10	11	2	9	3	停滞前線
23	1989	8	27	1989	8	28	206	18	115	25	86	10	台風
24	1989	8	30	1989	8	31	40	8	51	11	6	2	低気圧
25	1989	9	1	1989	9	4	112	11	143	15	56	5	停滞前線＋低気圧
26	1989	9	5	1989	9	7	114	10	109	16	84	8	停滞前線
27	1989	9	13	1989	9	16	136	17	77	18	18	5	停滞前線
28	1989	9	18	1989	9	20	164	15	103	10	113	17	台風
29	1989	9	22	1989	9	23	37	6	59	15	14	3	低気圧
30	1989	9	28	1989	9	28	41	8	52	17	18	5	低気圧
31	1989	10	16	1989	10	18	0	0	109	19	15	3	低気圧
32	1989	10	19	1989	10	20	0	0	59	15	20	4	低気圧
33	1989	11	1	1989	11	2	0	0	80	13	20	4	低気圧
34	1989	11	8	1989	11	10	0	0	82	10	30	11	停滞前線＋低気圧
35	1990	1	12	1990	1	13	0	0	59	11	5	1	低気圧
36	1990	2	10	1990	2	11	0	0	71	12	37	4	低気圧
37	1990	3	11	1990	3	13	0	0	52	10	43	6	低気圧
38	1990	3	24	1990	3	25	0	0	80	12	54	8	低気圧
39	1990	4	28	1990	4	29	0	0	51	12	25	4	低気圧
40	1990	5	14	1990	5	15	0	0	90	15	18	4	低気圧

解析対象降雨事例(2)

降雨番号	降雨開始日			降雨終了日			立山		宇奈月		白馬		降雨原因
	年	月	日	年	月	日	総雨量	最大1時間雨量	総雨量	最大1時間雨量	総雨量	最大1時間雨量	
41	1990	6	15	1990	6	17	112	30	76	20	68	8	停滞前線＋低気圧
42	1990	6	19	1990	6	21	212	15	69	10	77	6	停滞前線
43	1990	6	24	1990	6	27	469	25	102	8	112	9	停滞前線＋低気圧
44	1990	7	3	1990	7	4	56	12	28	6	32	5	停滞前線＋低気圧
45	1990	7	15	1990	7	17	175	38	55	13	77	19	停滞前線
46	1990	8	10	1990	8	11	136	18	38	7	44	6	台風
47	1990	9	7	1990	9	7	38	13	50	12	19	5	停滞前線
48	1990	9	12	1990	9	15	212	34	129	16	71	11	停滞前線
49	1990	9	19	1990	9	20	173	29	118	27	91	14	台風
50	1990	10	4	1990	10	6	0	0	105	15	34	6	停滞前線
51	1990	10	7	1990	10	10	0	0	76	14	34	7	台風
52	1990	11	4	1990	11	5	0	0	50	12	27	4	低気圧
53	1990	11	9	1990	11	11	0	0	105	10	26	7	低気圧
54	1990	11	20	1990	11	21	0	0	95	14	13	4	低気圧
55	1990	12	11	1990	12	13	0	0	84	15	18	3	低気圧
56	1991	2	28	1991	2	28	0	0	60	10	36	5	低気圧
57	1991	4	18	1991	4	18	0	0	71	27	40	6	低気圧
58	1991	4	29	1991	4	30	0	0	60	13	5	3	低気圧
59	1991	6	13	1991	6	13	122	21	76	20	46	12	停滞前線
60	1991	6	22	1991	6	25	76	14	35	11	34	4	停滞前線＋低気圧
61	1991	6	26	1991	6	30	240	17	184	20	86	11	停滞前線＋低気圧
62	1991	7	4	1991	7	6	77	15	65	15	36	9	停滞前線＋低気圧
63	1991	7	12	1991	7	14	204	27	136	18	105	12	停滞前線＋低気圧
64	1991	7	15	1991	7	18	279	19	64	13	105	9	停滞前線＋低気圧
65	1991	7	20	1991	7	20	102	16	18	5	50	15	低気圧
66	1991	7	21	1991	7	22	124	21	56	9	55	6	停滞前線
67	1991	7	31	1991	8	2	79	20	43	11	14	6	停滞前線
68	1991	8	6	1991	8	8	52	9	93	12	20	3	停滞前線＋低気圧
69	1991	8	29	1991	8	31	177	23	60	5	107	27	台風
70	1991	9	12	1991	9	15	108	20	124	6	48	5	台風
71	1991	9	18	1991	9	20	92	10	38	5	72	12	台風
72	1991	9	30	1991	10	2	161	12	120	9	83	6	停滞前線＋低気圧
73	1991	10	14	1991	10	15	0	0	76	13	1	1	低気圧
74	1991	11	8	1991	11	9	0	0	70	15	9	3	低気圧
75	1991	11	23	1991	11	24	0	0	76	10	6	2	低気圧
76	1991	12	8	1991	12	10	0	0	60	10	7	1	低気圧
77	1991	12	18	1991	12	18	0	0	63	10	7	3	冬型
78	1992	5	23	1992	5	24	0	0	70	16	18	4	大気不安定
79	1992	7	10	1992	7	14	167	13	56	6	30	12	停滞前線
80	1992	7	17	1992	7	18	268	31	42	10	93	11	停滞前線＋低気圧

解析対象降雨事例(3)

降雨番号	降雨開始日			降雨終了日			立山		宇奈月		白馬		降雨原因
	年	月	日	年	月	日	総雨量	最大1時間雨量	総雨量	最大1時間雨量	総雨量	最大1時間雨量	
81	1992	7	31	1992	8	1	67	14	66	19	14	4	低気圧
82	1992	8	8	1992	8	9	78	20	49	11	9	2	台風
83	1992	9	2	1992	9	3	207	18	43	12	15	3	低気圧
84	1992	9	25	1992	9	26	44	19	60	11	22	7	低気圧
85	1992	10	8	1992	10	10	0	0	74	18	58	7	低気圧
86	1992	11	20	1992	11	21	0	0	100	17	14	3	冬型
87	1992	12	8	1992	12	8	0	0	75	18	23	5	低気圧
88	1993	2	7	1993	2	8	0	0	78	11	27	4	低気圧
89	1993	3	24	1993	3	25	0	0	53	10	29	4	低気圧
90	1993	5	13	1993	5	14	0	0	159	16	81	6	停滞前線
91	1993	6	19	1993	6	20	0	0	91	9	95	12	低気圧
92	1993	7	2	1993	7	3	58	10	45	11	41	9	停滞前線＋低気圧
93	1993	7	9	1993	7	10	113	20	35	7	21	6	停滞前線＋低気圧
94	1993	7	11	1993	7	15	376	30	209	29	173	11	停滞前線＋低気圧
95	1993	8	3	1993	8	3	51	13	14	4	13	2	大気不安定
96	1993	8	13	1993	8	14	148	26	44	8	42	8	低気圧
97	1993	8	15	1993	8	17	154	17	173	26	105	14	停滞前線＋低気圧
98	1993	8	18	1993	8	21	182	19	125	20	62	9	停滞前線＋低気圧
99	1993	9	13	1993	9	14	87	13	63	21	39	6	低気圧
100	1993	9	17	1993	9	19	103	12	52	21	45	4	低気圧
101	1993	9	29	1993	10	1	70	16	103	17	29	8	低気圧
102	1993	11	21	1993	11	22	0	0	98	17	14	5	低気圧
103	1994	5	26	1994	5	27	0	0	51	16	13	3	低気圧
104	1994	6	27	1994	6	28	85	16	26	7	15	2	停滞前線
105	1994	7	1	1994	7	3	125	10	31	4	15	2	停滞前線
106	1994	8	18	1994	8	18	3	2	46	24	52	25	大気不安定
107	1994	9	6	1994	9	8	76	19	27	6	6	2	低気圧
108	1994	9	16	1994	9	18	76	13	30	8	100	25	停滞前線＋低気圧
109	1994	9	29	1994	9	30	78	16	23	8	59	18	台風
110	1994	10	16	1994	10	17	0	0	81	18	23	5	低気圧
111	1994	12	2	1994	12	6	0	0	173	10	60	5	低気圧
112	1994	12	12	1994	12	16	0	0	130	10	48	2	冬型
113	1995	1	3	1995	1	6	0	0	132	10	44	2	低気圧
114	1995	1	9	1995	1	16	0	0	148	11	65	3	冬型
115	1995	3	17	1995	3	17	0	0	54	12	4	3	低気圧
116	1995	4	23	1995	4	23	0	0	74	23	26	5	低気圧
117	1995	5	14	1995	5	17	0	0	67	9	74	12	低気圧
118	1995	6	18	1995	6	20	84	15	21	4	6	1	停滞前線＋低気圧
119	1995	6	26	1995	6	26	66	14	21	5	31	6	停滞前線＋低気圧
120	1995	7	2	1995	7	6	210	31	162	32	132	11	停滞前線

解析対象降雨事例(4)

降雨番号	降雨開始日			降雨終了日			立山		宇奈月		白馬		降雨原因
	年	月	日	年	月	日	総雨量	最大1時間雨量	総雨量	最大1時間雨量	総雨量	最大1時間雨量	
121	1995	7	7	1995	7	10	242	20	86	12	125	15	停滞前線
122	1995	7	11	1995	7	14	665	35	396	42	368	39	停滞前線＋低気圧
123	1995	7	15	1995	7	18	341	25	183	24	74	15	停滞前線＋低気圧
124	1995	7	19	1995	7	22	266	21	161	23	132	10	停滞前線＋低気圧
125	1995	8	10	1995	8	11	124	22	71	23	30	10	低気圧
126	1995	8	16	1995	8	16	79	51	0	0	12	8	低気圧
127	1995	8	20	1995	8	22	54	11	63	16	10	3	低気圧
128	1995	8	30	1995	9	1	195	27	80	11	68	10	低気圧
129	1995	9	3	1995	9	3	102	21	10	4	20	7	低気圧
130	1995	10	1	1995	10	3	33	4	51	13	14	2	低気圧
131	1995	10	24	1995	10	25	0	0	77	13	24	4	低気圧
132	1995	11	7	1995	11	9	0	0	146	13	34	5	低気圧
133	1995	11	14	1995	11	15	0	0	86	11	12	3	低気圧
134	1996	1	8	1996	1	11	0	0	88	10	28	3	冬型
135	1996	6	17	1996	6	19	0	0	104	14	49	7	低気圧
136	1996	6	24	1996	6	26	431	25	263	29	213	12	停滞前線＋低気圧
137	1996	6	28	1996	6	28	18	5	11	6	51	10	停滞前線＋低気圧
138	1996	7	3	1996	7	3	20	8	50	18	11	7	大気不安定
139	1996	7	22	1996	7	23	97	18	23	11	32	7	低気圧
140	1996	8	14	1996	8	16	175	15	129	18	120	18	台風
141	1996	8	26	1996	8	29	274	18	70	7	101	6	停滞前線
142	1996	9	6	1996	9	7	63	10	51	22	10	2	停滞前線＋低気圧
143	1996	9	9	1996	9	10	76	10	52	7	40	6	停滞前線＋低気圧
144	1996	11	5	1996	11	6	0	0	83	14	23	4	低気圧
145	1996	11	27	1996	11	28	0	0	51	10	31	5	低気圧
146	1996	12	4	1996	12	6	0	0	130	13	33	3	低気圧
147	1996	12	17	1996	12	18	0	0	69	10	7	1	低気圧
148	1997	1	1	1997	1	4	0	0	107	14	10	2	低気圧
149	1997	3	1	1997	3	1	0	0	56	13	25	5	低気圧
150	1997	3	29	1997	3	31	0	0	62	14	11	2	低気圧
151	1997	5	8	1997	5	9	0	0	112	20	61	9	低気圧
152	1997	6	28	1997	6	29	58	8	65	11	81	12	台風
153	1997	7	2	1997	7	3	167	18	24	3	24	2	停滞前線
154	1997	7	7	1997	7	11	289	20	204	17	134	9	停滞前線
155	1997	7	15	1997	7	17	0	0	129	14	123	12	停滞前線
156	1997	8	4	1997	8	6	89	17	53	20	18	7	停滞前線＋低気圧
157	1997	8	7	1997	8	8	108	15	101	19	82	15	停滞前線
158	1997	9	3	1997	9	4	38	8	66	18	8	4	停滞前線
159	1997	9	6	1997	9	8	67	10	34	7	30	5	停滞前線
160	1997	9	13	1997	9	15	73	9	98	25	38	8	台風 ＋ 停滞前線

解析対象降雨事例(5)

降雨番号	降雨開始日			降雨終了日			立山		宇奈月		白馬		降雨原因
	年	月	日	年	月	日	総雨量	最大1時間雨量	総雨量	最大1時間雨量	総雨量	最大1時間雨量	
161	1997	10	30	1997	11	1	0	0	70	10	2	1	低気圧
162	1997	11	22	1997	11	23	0	0	78	10	6	1	低気圧
163	1997	11	26	1997	11	27	0	0	76	22	46	8	低気圧
164	1997	11	29	1997	11	30	0	0	92	22	40	9	低気圧
165	1998	1	23	1998	1	25	0	0	51	10	22	4	冬型
166	1998	3	20	1998	3	21	0	0	57	11	58	8	低気圧
167	1998	4	24	1998	4	26	0	0	77	10	14	3	低気圧
168	1998	5	2	1998	5	4	0	0	119	28	51	9	低気圧
169	1998	5	7	1998	5	9	0	0	105	14	52	5	停滞前線
170	1998	5	11	1998	5	13	0	0	110	20	100	7	低気圧
171	1998	5	24	1998	5	25	0	0	77	16	31	4	低気圧
172	1998	6	19	1998	6	20	80	23	48	14	47	10	停滞前線＋低気圧
173	1998	6	27	1998	6	29	45	13	70	11	70	6	停滞前線
174	1998	7	9	1998	7	11	22	10	262	36	136	17	停滞前線
175	1998	7	29	1998	7	31	40	6	103	25	8	2	低気圧
176	1998	8	2	1998	8	5	333	31	91	15	53	9	停滞前線
177	1998	8	6	1998	8	7	109	27	38	18	26	10	停滞前線
178	1998	8	12	1998	8	14	356	50	188	30	140	14	停滞前線
179	1998	8	15	1998	8	19	214	29	139	20	112	17	停滞前線＋低気圧
180	1998	8	27	1998	8	29	103	13	74	11	88	19	停滞前線
181	1998	9	15	1998	9	17	194	18	136	17	71	9	台風
182	1998	9	21	1998	9	23	187	33	100	37	74	12	台風
183	1998	10	7	1998	10	9	0	0	82	13	17	3	低気圧
184	1998	10	15	1998	10	17	0	0	110	10	71	5	低気圧
185	1999	5	4	1999	5	5	0	0	74	12	30	5	低気圧
186	1999	5	27	1999	5	27	0	0	51	12	49	11	低気圧
187	1999	6	15	1999	6	20	211	14	153	10	102	7	停滞前線＋低気圧
188	1999	6	23	1999	6	25	142	22	71	11	82	9	停滞前線＋低気圧
189	1999	6	29	1999	7	1	159	20	99	28	73	8	低気圧
190	1999	7	2	1999	7	5	50	9	83	17	54	8	停滞前線＋低気圧
191	1999	8	14	1999	8	15	71	11	48	9	69	11	熱帯低気圧
192	1999	8	23	1999	8	24	47	14	54	16	2	1	熱帯低気圧
193	1999	8	26	1999	8	29	109	14	65	18	34	4	停滞前線＋低気圧
194	1999	9	1	1999	9	2	75	17	39	16	13	6	停滞前線
195	1999	9	4	1999	9	4	1	1	0	0	65	55	大気不安定
196	1999	9	8	1999	9	8	79	23	45	16	8	4	停滞前線
197	1999	9	14	1999	9	15	202	32	206	19	155	21	熱帯低気圧
198	1999	9	20	1999	9	23	241	17	142	18	113	9	台風 ＋ 停滞前線
199	1999	10	2	1999	10	3	28	9	68	11	10	2	低気圧
200	1999	10	6	1999	10	7	63	17	36	8	26	5	停滞前線
201	1999	11	1	1999	11	2	0	0	110	15	39	6	低気圧
202	1999	11	12	1999	11	13	0	0	60	12	18	3	低気圧
203	1999	11	15	1999	11	17	0	0	128	13	18	4	冬型
204	1999	12	4	1999	12	7	0	0	100	10	22	3	低気圧

付録　3

GPS ゾンデデータ取得状況（1999 年）

観測番号	観測時刻	観測終了高度(m)	観測番号	観測時刻	観測終了高度(m)
1	6 月 24 日 21 時	10,000	13	6 月 27 日 21 時	10,000
2	6 月 25 日 03 時	10,000	14	6 月 28 日 03 時	10,000
3	6 月 25 日 09 時	10,000	15	6 月 28 日 09 時	10,000
4	6 月 25 日 15 時	10,000	16	6 月 28 日 15 時	10,000
5	6 月 25 日 21 時	10,000	17	6 月 28 日 21 時	10,000
6	6 月 26 日 03 時	10,000	18	6 月 29 日 03 時	10,000
7	6 月 26 日 09 時	10,000	19	6 月 29 日 09 時	10,000
8	6 月 26 日 15 時	10,000	20	6 月 29 日 15 時	10,000
9	6 月 26 日 21 時	10,000	21	6 月 29 日 21 時	4,500
10	6 月 27 日 03 時	5,200	22	6 月 30 日 03 時	4,000
11	6 月 27 日 09 時	4,500	23	6 月 30 日 09 時	10,000
12	6 月 27 日 15 時	10,000			

X-band ミニレーダーの観測モードおよびデータ取得状況（1999 年）

観測地点	開始時刻	終了時刻	観測範囲（NM）	時間分解能（秒）	欠測期間
富山大学立山施設	6/24 17:00	6/25 06:12	4	30	6/25 03:23-04:48
	6/25 06:30	6/25 12:18	4	30	6/25 11:29-11:34
	6/25 12:50	6/27 06:20	16	30	無
	6/27 06:24	6/27 09:00	16	30	6/27 06:48-06:51
	6/27 09:01	6/27 21:10	4	30	6/27 09:01-10:41
	6/28 00:24	6/28 13:07	4,16	30	無
	6/29 09:47	6/30 00:00	16	30	無
	6/30 00:17	6/30 08:23	4	30	6/30 00:17-00:47 6/30 03:03-07:07 6/30 07:45-07:59
黒部ダム	6/24 17:40	6/30 10:55	4	30	無

注）1(NM)=1852(m)

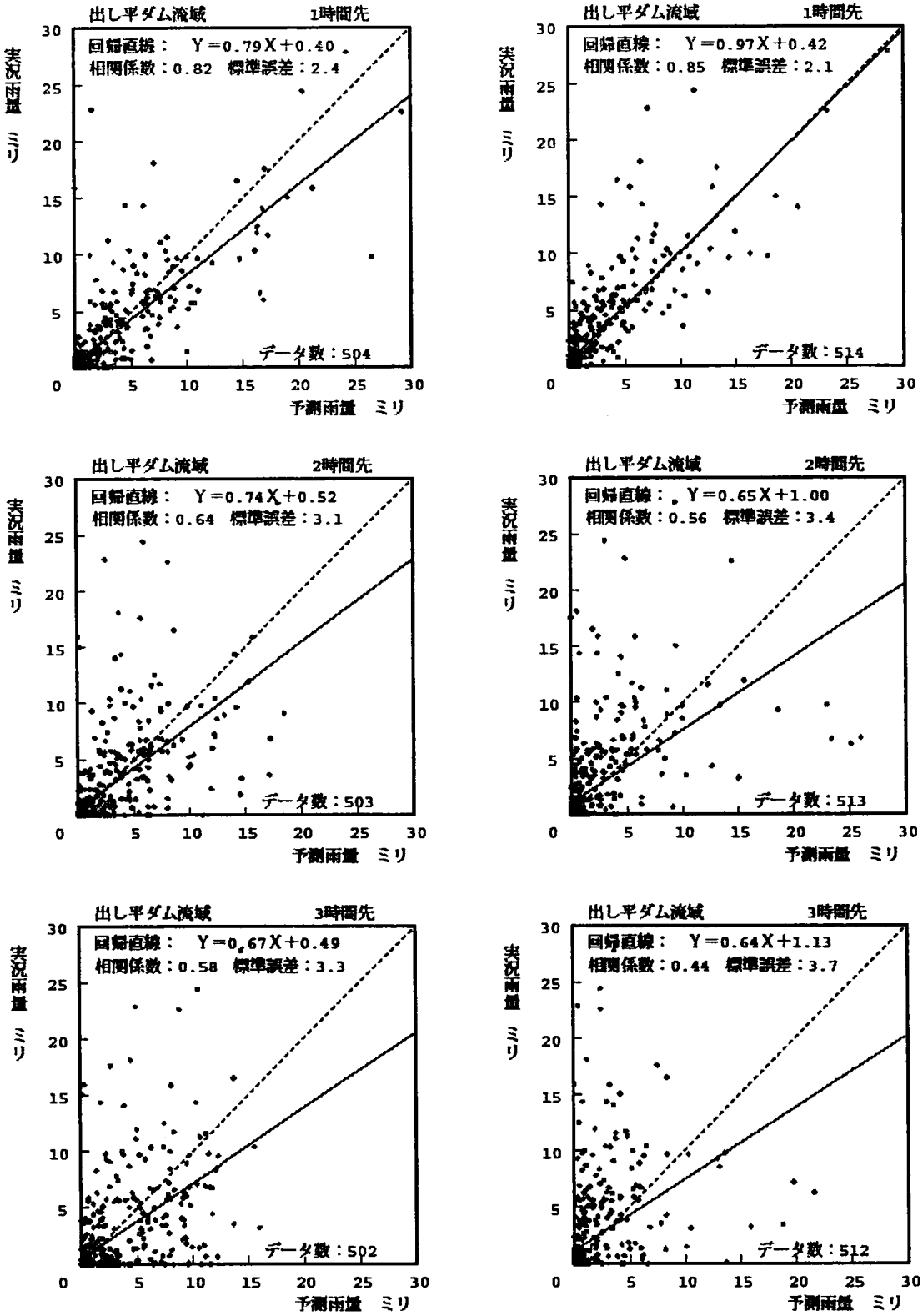
GPS ゾンデデータ取得状況（2000 年）

観測番号	観測時刻	観測終了高度(m)	観測番号	観測時刻	観測終了高度(m)
1	6 月 27 日 9 時	10,000	21	6 月 29 日 21 時	10,000
2	6 月 27 日 12 時	10,000	22	6 月 30 日 0 時	10,000
3	6 月 27 日 15 時	10,000	23	6 月 30 日 3 時	10,000
4	6 月 27 日 18 時	10,000	24	6 月 30 日 6 時	10,000
5	6 月 27 日 21 時	10,000	25	6 月 30 日 9 時	10,000
6	6 月 28 日 0 時	10,000	26	6 月 30 日 12 時	10,000
7	6 月 28 日 3 時	10,000	27	6 月 30 日 15 時	10,000
8	6 月 28 日 6 時	5,800	28	6 月 30 日 18 時	10,000
9	6 月 28 日 9 時	10,000	29	6 月 30 日 21 時	10,000
10	6 月 28 日 12 時	10,000	30	7 月 1 日 0 時	10,000
11	6 月 28 日 15 時	10,000	31	7 月 1 日 3 時	10,000
12	6 月 28 日 18 時	10,000	32	7 月 1 日 6 時	10,000
13	6 月 28 日 21 時	10,000	33	7 月 1 日 9 時	10,000
14	6 月 29 日 0 時	10,000	34	7 月 1 日 12 時	10,000
15	6 月 29 日 3 時	10,000	35	7 月 1 日 15 時	10,000
16	6 月 29 日 6 時	10,000	36	7 月 1 日 18 時	10,000
17	6 月 29 日 9 時	10,000	37	7 月 1 日 21 時	10,000
18	6 月 29 日 12 時	10,000	38	7 月 2 日 0 時	10,000
19	6 月 29 日 15 時	10,000	39	7 月 2 日 3 時	10,000
20	6 月 29 日 18 時	10,000	40	7 月 2 日 6 時	10,000

GPS ゾンデデータ取得状況（2001 年）

観測番号	観測時刻	最終観測高度(m)	観測番号	観測時刻	最終観測高度(m)
1	6 月 30 日 9 時	10,000	7	7 月 1 日 3 時	6,300
2	6 月 30 日 12 時	10,000	8	7 月 1 日 6 時	6,300
3	6 月 30 日 15 時	10,000	9	7 月 1 日 9 時	10,000
4	6 月 30 日 18 時	10,000	10	7 月 1 日 12 時	10,000
5	6 月 30 日 21 時	10,000	11	7 月 1 日 15 時	10,000
6	7 月 1 日 0 時	10,000	12	7 月 1 日 18 時	10,000

付録　4



予測雨量と実況雨量の比較（１～３時間先予測）

左：ハイブリッドモデル 2005　　右：気象庁降水短時間予報

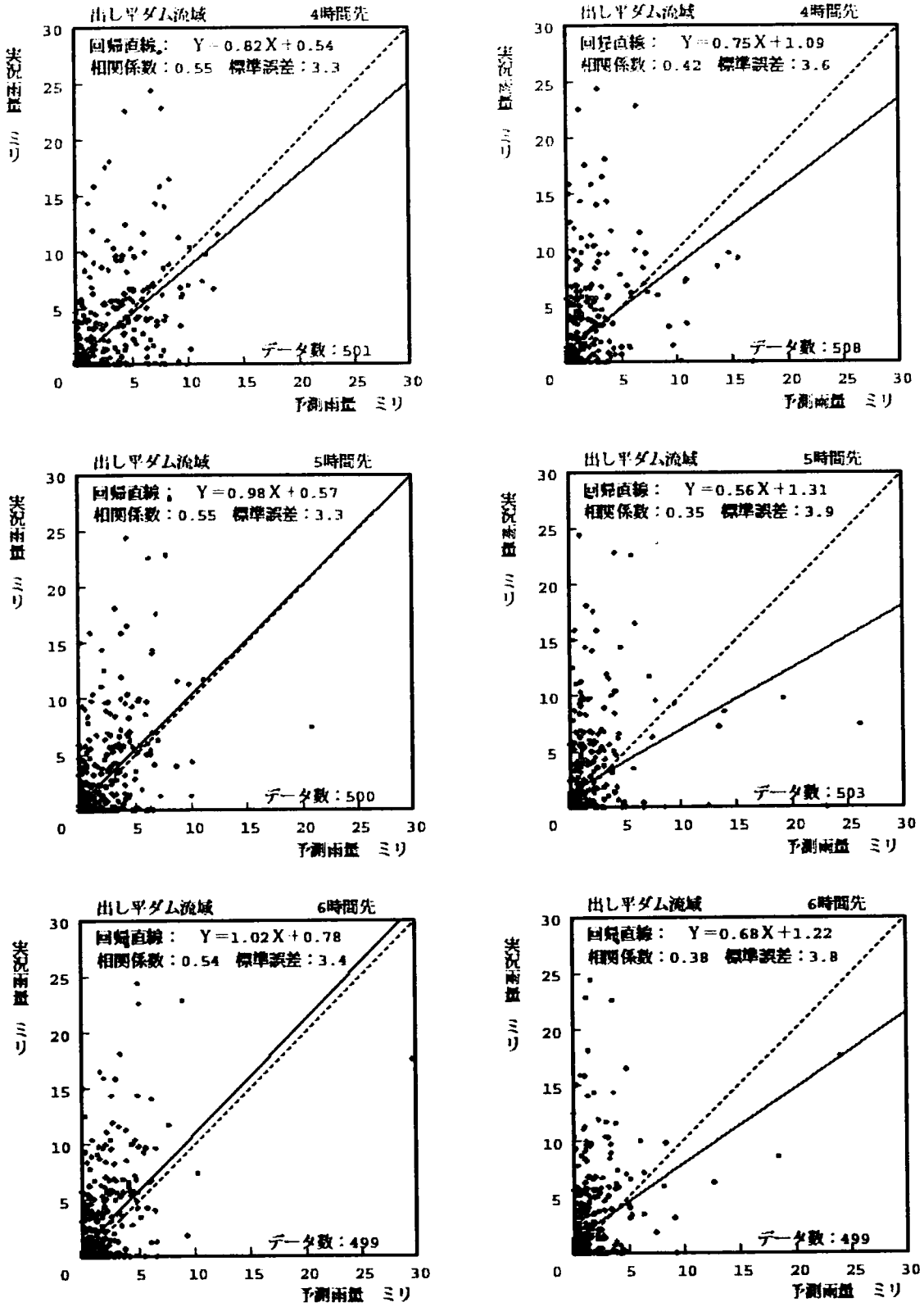
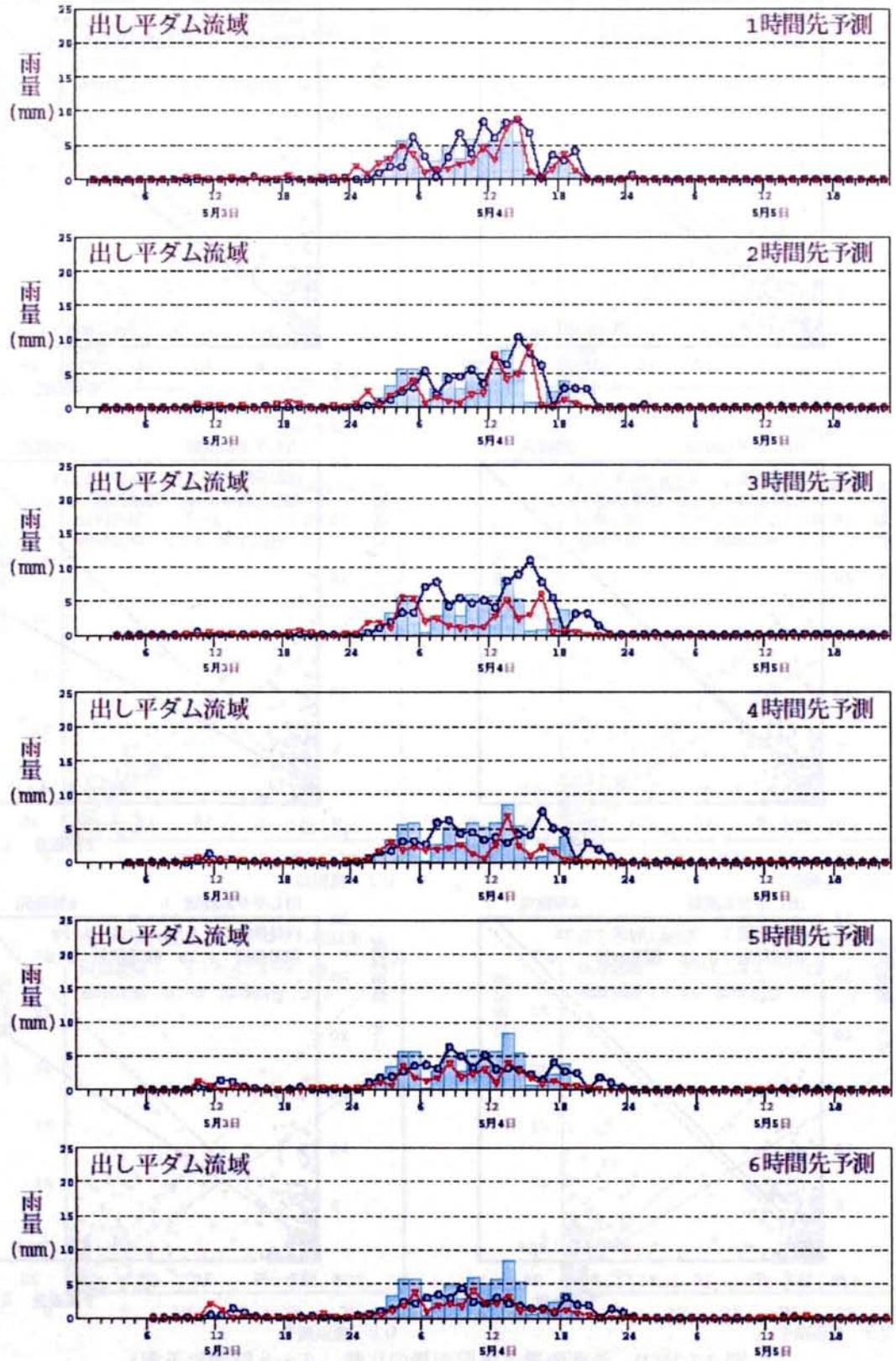


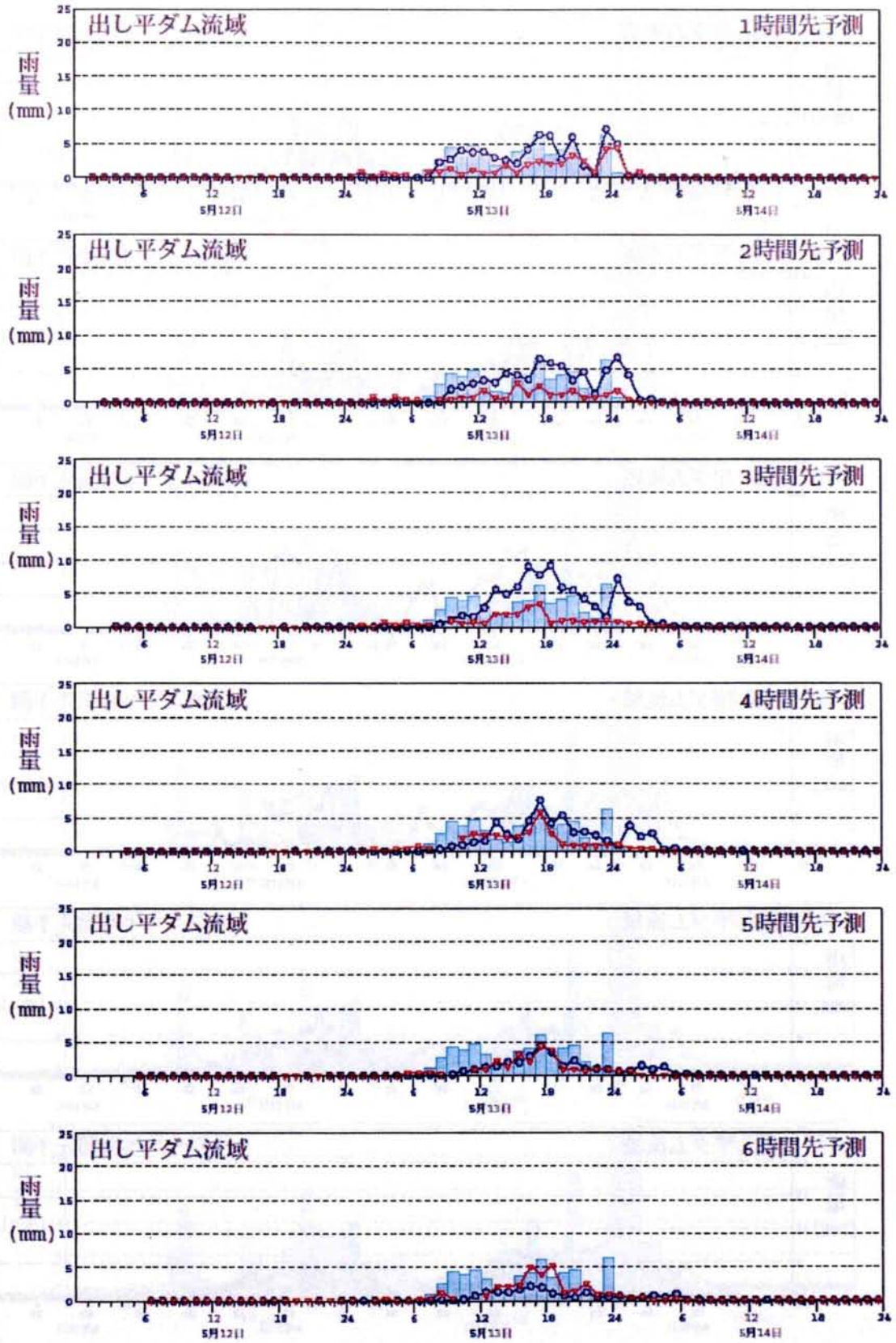
図-3.3.25(2) 予測雨量と実況雨量の比較（4～6時間先予測）

左：ハイブリッドモデル 2005　　右：気象庁降水短時間予報



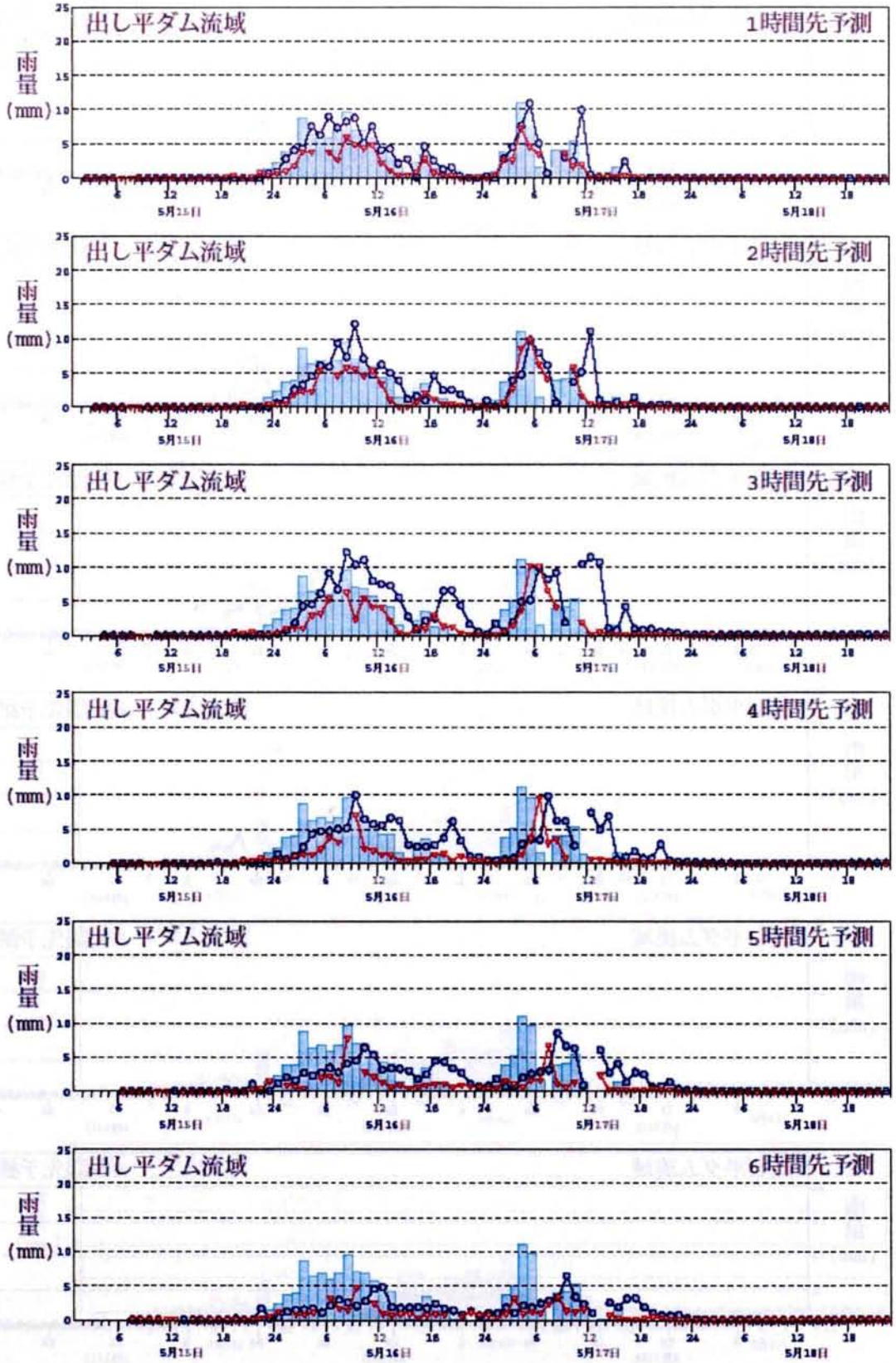
予測雨量と実況雨量の比較（No.1 ：2004 年 5 月 3 日 1 時～5 日 23 時）

棒グラフ：実況 ●：ハイブリッドモデル 2005 ▼：気象庁降水短時間予報



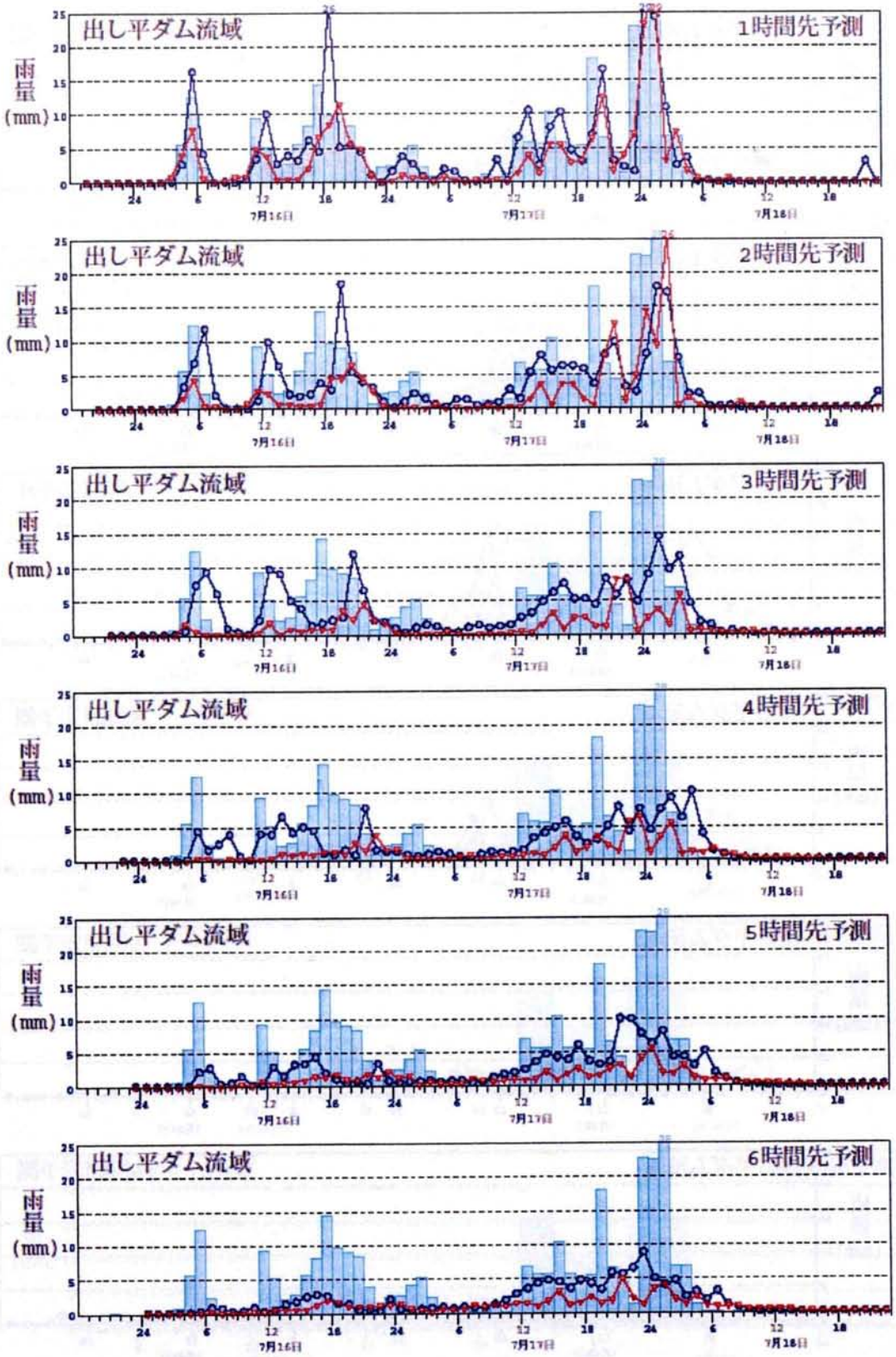
予測雨量と実況雨量の比較（No.2：2004 年 5 月 12 日 1 時～14 日 24 時）

棒グラフ：実況　●：ハイブリッドモデル 2005　▼：気象庁降水短時間予報



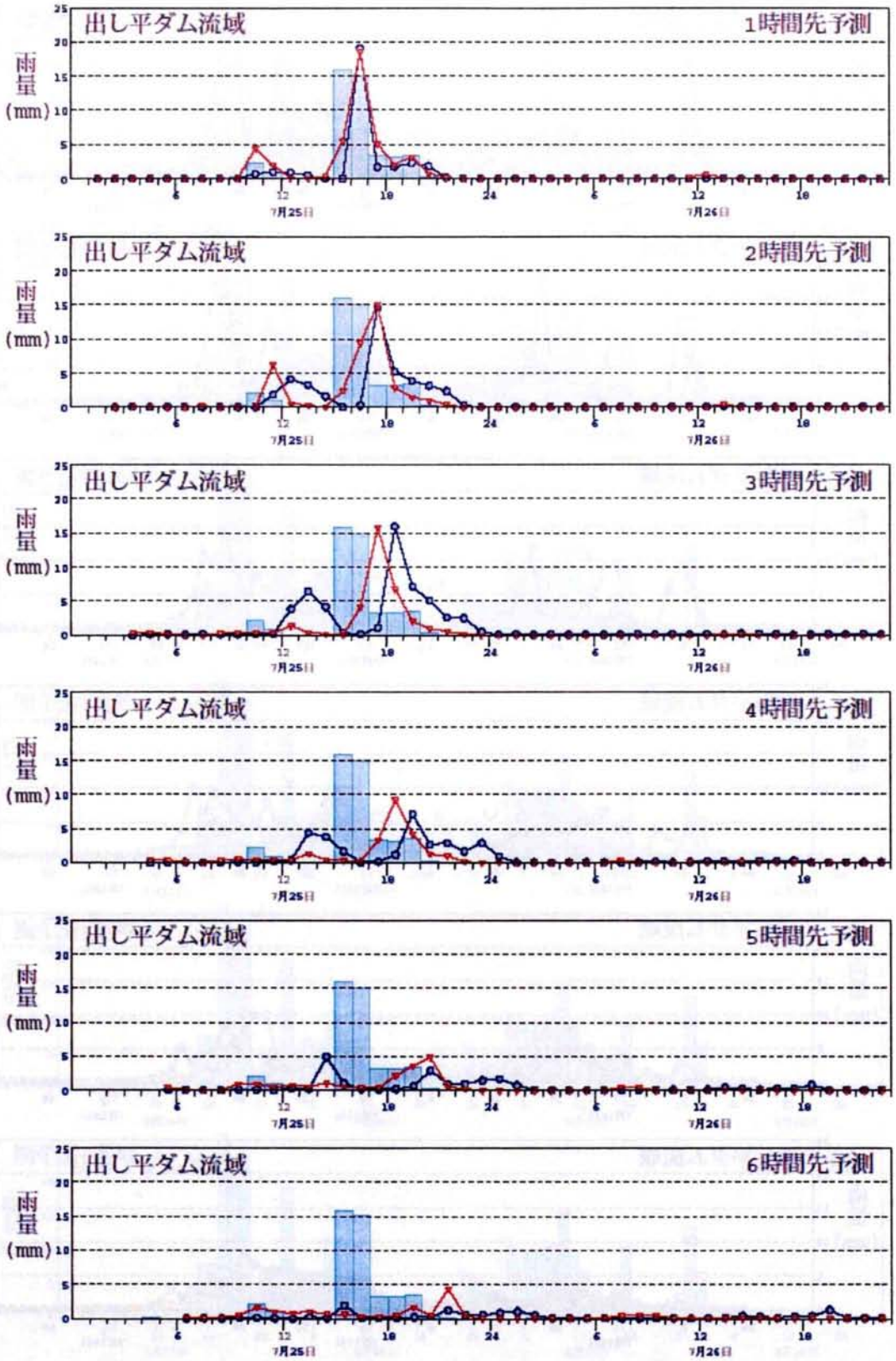
予測雨量と実況雨量の比較（No.3：2004 年 5 月 15 日 2 時～18 日 23 時）

棒グラフ：実況　●：ハイブリッドモデル 2005　▼：気象庁降水短時間予報



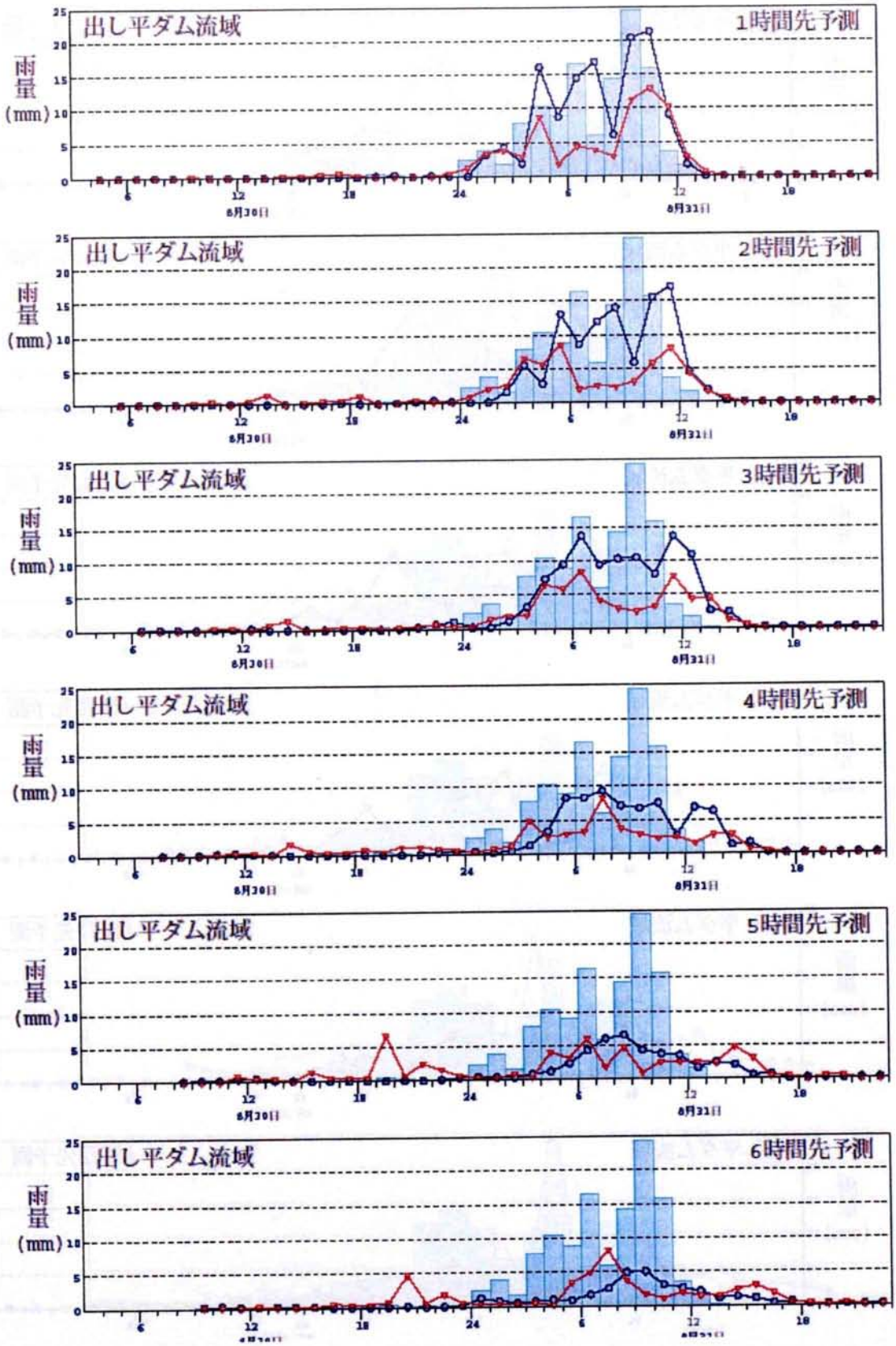
予測雨量と実況雨量の比較（No.4： 2004 年 7 月 15 日 19 時～18 日 23 時）

棒グラフ：実況　●：ハイブリッドモデル 2005　▼：気象庁降水短時間予報



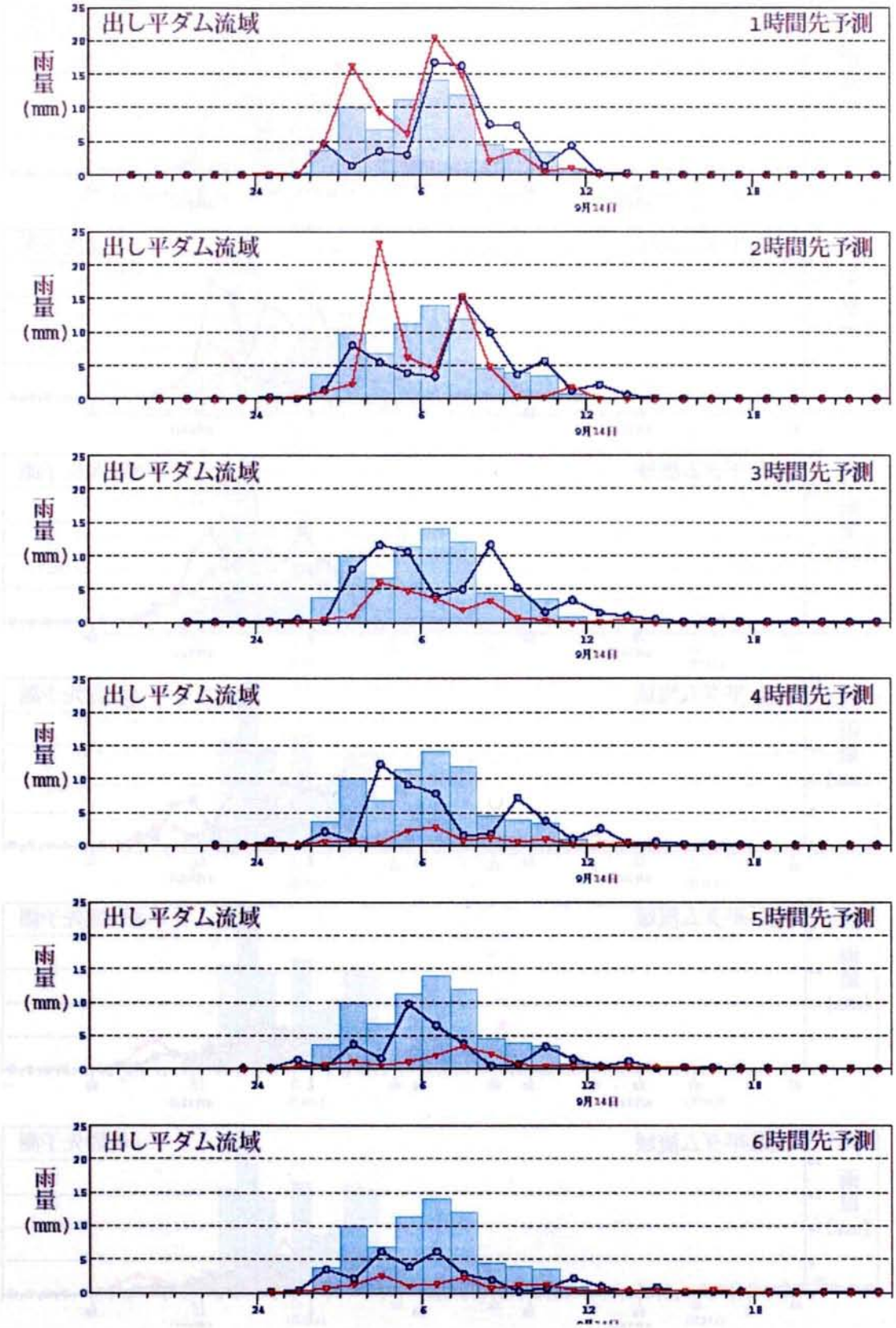
予測雨量と実況雨量の比較（No.5 ：2004 年 7 月 25 日 1 時～26 日 23 時）

棒グラフ：実況 ●：ハイブリッドモデル 2005 ▼：気象庁降水短時間予報



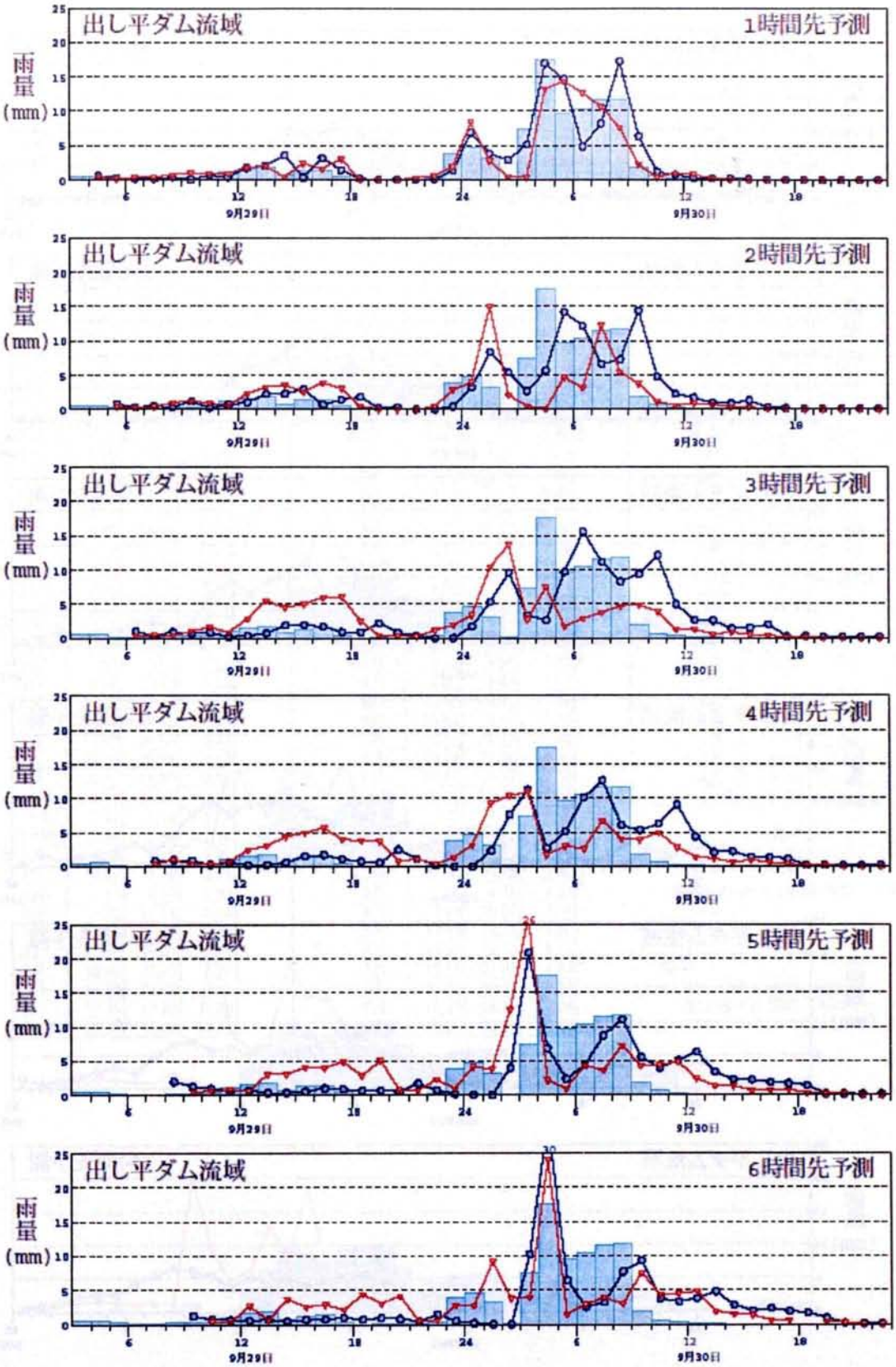
予測雨量と実況雨量の比較（No.6 ：2004 年 8 月 30 日 4 時～31 日 23 時）

棒グラフ：実況 ●：ハイブリッドモデル 2005 ▼：気象庁降水短時間予報



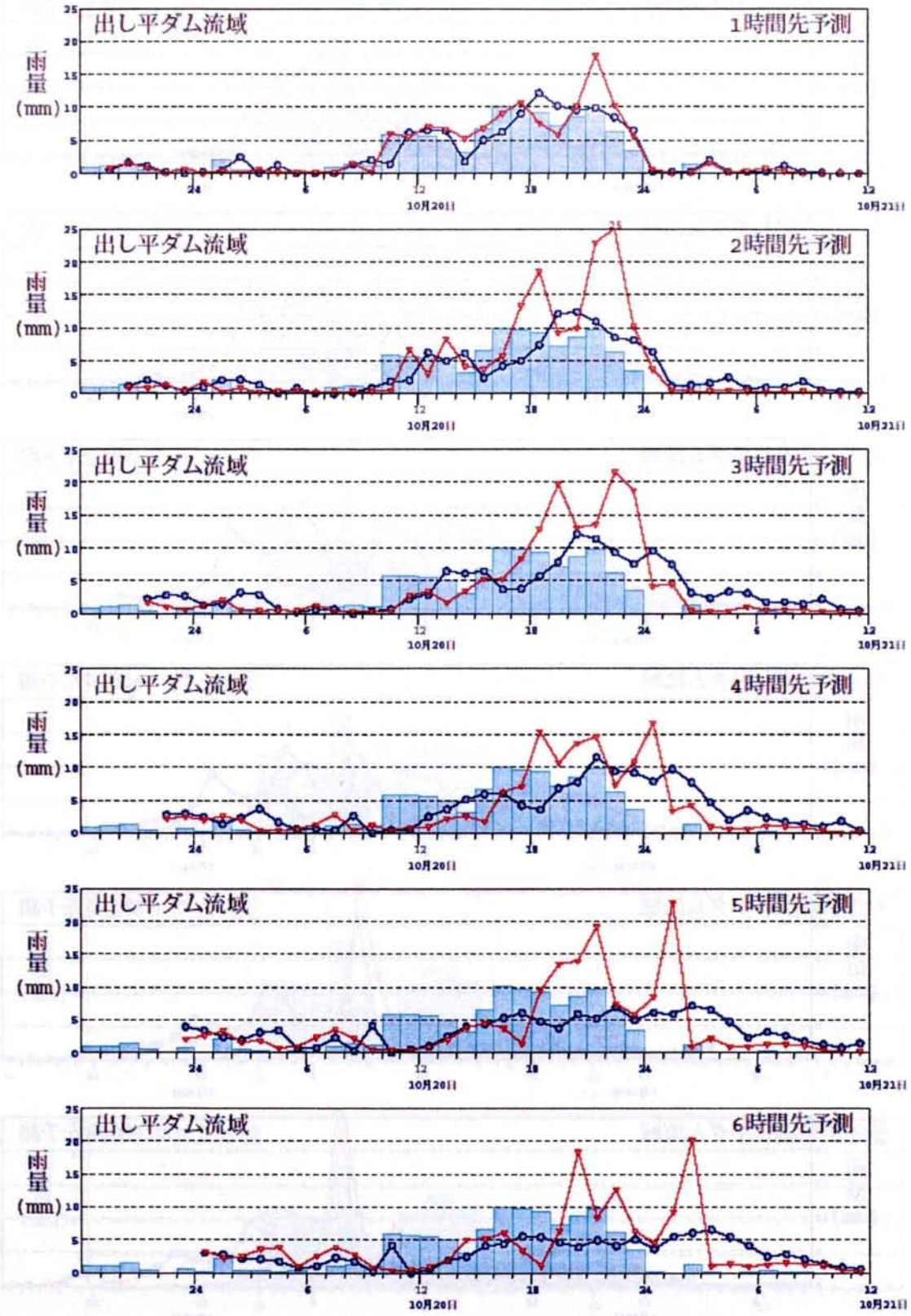
予測雨量と実況雨量の比較（No.7： 2004 年 9 月 13 日 19 時～14 日 23 時）

棒グラフ：実況 ●：ハイブリッドモデル 2005 ▼：気象庁降水短時間予報



予測雨量と実況雨量の比較（No.8：2004 年 9 月 29 日 4 時～30 日 23 時）

棒グラフ：実況　●：ハイブリッドモデル 2005　▼：気象庁降水短時間予報



予測雨量と実況雨量の比較（No.9：2004 年 10 月 19 日 19 時～21 日 12 時）

棒グラフ：実況　●：ハイブリッドモデル 2005　▼：気象庁降水短時間予報

付録　5

出し平ダムと仙人谷ダムの月ごとの平均気温

	仙人谷ダム	出し平ダム	気温差
1994年 11月	5.78	8.28	2.50
12月	-0.08	2.31	2.40
1995年 1月	-3.62	-0.94	2.67
2月	-3.15	-0.55	2.60
3月	0.37	2.39	2.02
4月	4.88	8.19	3.31
5月	10.63	13.19	2.57
6月	13.05	15.42	2.37
7月	16.38	19.07	2.70
8月	19.33	22.44	3.10
9月	14.23	16.99	2.77
10月	10.74	13.66	2.92
11月	2.33	5.32	2.99
12月	-2.21	1.09	3.30
1996年 1月	-2.97	-0.55	2.42
2月	-3.94	-0.98	2.96
3月	0.07	1.88	1.81
4月	2.90	6.27	3.36
5月	9.88	12.64	2.76
6月	13.36	15.95	2.59
7月	16.97	19.37	2.40
8月	18.40	21.56	3.16
9月	14.39	16.97	2.58
10月	9.65	12.70	3.05
11月	4.65	7.31	2.66
12月	-0.07	2.85	2.92
1997年 1月	-3.14	0.06	3.20
2月	-3.26	-0.46	2.80
3月	1.24	3.53	2.29
4月	6.10	9.43	3.33
5月	11.32	14.12	2.80
6月	14.76	17.59	2.83
7月	17.80	20.63	2.82
8月	19.59	22.55	2.97
9月	15.73	18.30	2.57
10月	8.73	11.57	2.84
11月	5.41	8.16	2.74
12月	0.06	2.80	2.74
1998年 1月	-2.39	0.48	2.87
2月	-0.89	1.18	2.07
3月	1.13	4.06	2.93
4月	8.90	11.54	2.64
5月	13.56	15.82	2.26
6月	15.56	18.05	2.49
7月	18.85	21.62	2.78
8月	18.68	21.20	2.52
9月	17.38	19.68	2.29
10月	12.63	15.20	2.57

	仙人谷ダム	出し平ダム	気温差
1998年 11月	4.76	7.43	2.67
12月	0.53	4.02	3.49
1999年 1月	-2.62	-0.07	2.55
2月	-3.25	-0.73	2.53
3月	1.34	3.33	1.99
4月	6.09	9.06	2.97
5月	11.48	13.75	2.27
6月	14.31	16.92	2.60
7月	17.58	20.33	2.75
8月	20.60	22.80	2.20
9月	17.85	20.53	2.67
10月	10.81	13.70	2.90
11月	5.16	8.20	3.04
12月	-0.73	2.29	3.03
2000年 1月	-1.69	1.36	3.05
2月	-4.39	-1.37	3.02
3月	-0.93	1.51	2.43
4月	4.20	7.50	3.30
5月	11.01	13.68	2.67
6月	13.75	16.13	2.38
7月	18.14	20.93	2.79
8月	20.72	22.87	2.15
9月	16.87	19.13	2.26
10月	11.20	13.34	2.14
11月	5.88	8.23	2.35
12月	-0.10	2.53	2.63
2001年 1月	-3.65	-1.30	2.35
2月	-2.79	-0.34	2.45
3月	0.03	1.84	1.81
4月	5.96	8.43	2.47
5月	12.35	14.11	1.76
6月	14.51	16.45	1.94
7月	19.53	22.43	2.90
8月	19.81	22.60	2.78
9月	15.91	18.27	2.36
10月	10.90	12.97	2.07
11月	4.60	7.06	2.46
12月	-0.81	1.72	2.53
2002年 1月	-1.94	0.22	2.16
2月	-1.80	0.75	2.56
3月	1.88	4.45	2.57
4月	7.68	10.82	3.14
5月	11.58	13.39	1.80
6月	14.59	16.70	2.11
7月	19.19	21.83	2.64
8月	19.84	22.27	2.42
9月	16.39	18.44	2.04
10月	10.21	12.66	2.45

	仙人谷ダム	出し平ダム	気温差
2002年 11月	1.30	4.24	2.95
12月	-0.97	1.65	2.62
2003年 1月	-3.67	-0.90	2.78
2月	-2.59	-0.17	2.42
3月	-0.86	1.70	2.57
4月	5.66	8.72	3.05
5月	12.21	13.70	1.50
6月	14.83	16.78	1.95
7月	15.92	18.45	2.54
8月	18.86	21.35	2.49
9月	16.65	18.90	2.25
10月	9.40	11.73	2.33
11月	7.84	9.75	1.91
12月	0.17	2.84	2.67
2004年 1月	-3.25	-0.31	2.94
2月	-1.62	0.88	2.50
3月	0.55	3.34	2.78
4月	6.30	9.84	3.54
5月	11.36	13.99	2.63
6月	14.77	17.30	2.53
7月	18.88	21.96	3.07
8月	20.09	22.45	2.36
9月	17.72	20.11	2.38
10月	11.20	13.16	1.97
11月	7.48	9.49	2.01
12月	1.64	4.00	2.36
2005年 1月	-2.77	-0.58	2.20
2月	-2.79	-0.63	2.16
3月	-0.53	1.50	2.03
4月	5.82	8.67	2.85
5月	10.65	12.42	1.77
6月	16.27	17.68	1.41
7月	17.75	19.48	1.73
8月	19.98	22.35	2.37
9月	18.35	20.14	1.79
10月	12.30	14.45	2.15

気温差の平均　2.55
（1994年11月～2005年10月）

標高100mあたりの気温差　0.494

参考
出し平ダム標高　346.7 m
仙人谷ダム標高　863.0 m